



HIERARQUIAS DAS APRENDIZAGENS DE GAGNÉ: UMA PROPOSTA DE ENSINO DA TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL NO ENSINO MÉDIO

Giovanni Sesostres Ferreira Ribeiro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade de Brasília no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Marcello Ferreira.

Junho de 2025

HIERARQUIAS DAS APRENDIZAGENS DE GAGNÉ: UMA PROPOSTA DE ENSINO DA TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL NO ENSINO MÉDIO

Giovanni Sesostres Ferreira Ribeiro

Orientador: Prof. Dr. Marcello Ferreira

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade de Brasília no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Dr. Marcello Ferreira

Universidade de Brasília (UnB)

Dr. Olavo Leopoldino da Silva Filho

Universidade de Brasília (UnB)

Dr. Tiago Destéffani Admiral

Instituto Federal Fluminense (IFF)

Brasília, DF
Junho de 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Ribeiro, Giovanni Sesostres Ferreira.

Hierarquias das aprendizagens de Gagné: uma proposta de ensino da Teoria da Relatividade Especial no Ensino Médio/ Giovanni Sesostres Ferreira Ribeiro; Orientador: Marcello Ferreira - Brasília: UnB / IF, 2025.

97 p.

Dissertação (Mestrado – Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Universidade de Brasília, 2025.

1. Ensino de Física. 2. Física Moderna e Contemporânea. 3. Gagné. 4. Hierarquias de Aprendizagem. 5. Relatividade. I. Ribeiro, Giovanni Sesostres Ferreira. II. Universidade de Brasília, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. III. Hierarquias das aprendizagens: uma proposta de ensino da Teoria da Relatividade Especial no Ensino Médio.

Dedico esta dissertação a meus pais, Arnaldo Ribeiro da Costa (*in memoriam*) e Lygia Cunha Ferreira Ribeiro, e ao meu filho, Luís Otávio Ribeiro.

Agradecimentos

A todos os que, de alguma maneira, contribuíram para a conclusão de tão valorosa etapa.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Marcello Ferreira, pelo enorme conhecimento compartilhado e, principalmente, pela fé na educação como o mais forte instrumento de justiça social.

A todos os meus colegas de curso, em especial à Francisca Vânia Pereira, à Kitéria Karoline e ao Wellington Sampaio, uma família que, neste curso, foi construída pela amizade e colaboração.

Aos professores do MNPEF na Universidade de Brasília, que, com toda competência, nos proporcionaram a oportunidade de sermos professores melhores.

Finalmente, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro a mim e ao MNPEF.

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

RESUMO

HIERARQUIAS DAS APRENDIZAGENS DE GAGNÉ: UMA PROPOSTA DE ENSINO DA TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL NO ENSINO MÉDIO

Giovanni Sesostres Ferreira Ribeiro

Orientador:

Prof. Dr. Marcello Ferreira

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade de Brasília no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Esta dissertação tem o propósito de trazer o ensino de Física Moderna e Contemporânea, comumente negligenciado na Educação Básica do Distrito Federal, ao alcance dos estudantes do Ensino Médio das escolas públicas. Apesar de relevância, a abordagem da Teoria da Relatividade naquele nível de ensino ainda é bastante limitada. Essa lacuna evidencia um problema pedagógico: a ausência de propostas didáticas sistematizadas que auxiliem aos docentes abordar a Relatividade de maneira estruturada e integrada com as exigências cognitivas dos estudantes. Assim, a presente pesquisa propõe a produção, aplicação e avaliação de uma sequência didática referenciada nas Hierarquias da Aprendizagem de Robert Gagné, modelo que estrutura os níveis de complexidade cognitiva em progressão ascendente e orienta o planejamento de instruções eficazes, organizando os conteúdos segundo níveis hierárquicos de aprendizagem. Primeiramente, foi feita uma análise da teoria de Gagné para que se pudesse investigar como esse aporte poderia apoiar o desenvolvimento hierárquico dos processos e conteúdos disponibilizados aos estudantes, com o objetivo de que sejam alcançados os conhecimentos da FMC e armazenados na memória de longa duração. A aplicação foi feita com uma turma do terceiro ano do Ensino Médio da rede pública do Distrito Federal. As aulas foram organizadas em três módulos: 1. Relatividade Clássica de Galileu (duas aulas); 2. Teoria da Relatividade Restrita (quatro aulas); 3. Teoria da Relatividade Geral (quatro aulas). As estratégias de aplicação passaram por aulas expositivas, projeções multimídia, abordagens experimentais, discussões em grupos e resolução de questões propostas. Durante a aplicação, notou-se a ausência clara de pré-requisitos que variam desde a falta de domínio de Matemática básica, até o fato de que nenhum estudante tinha conhecimento de fenômenos ondulatórios. Esses aspectos encadearam muitas ausências dos estudantes na aplicação da sequência didática, além de produzir dificuldades na aplicação que, entretanto, foram mitigadas pelas estratégias empreendidas. Os resultados em torno desse processo foram construídos por meio da análise dos registros elaborados pelo professor e das produções dos estudantes. Disso, constatamos o engajamento e evidências substanciais de aprendizagem de ordem superior, pelos que participaram integralmente, e

de aprendizagem parcial, pelos demais. Nesse sentido, a proposta da sequência didática se mostrou viável para aplicação no grupo de estudantes pesquisado, incorporando contribuições relevantes aos processos de ensino e aprendizagem.

Palavras-chave: Ensino de Física Moderna e Contemporânea. Hierarquias de Aprendizagem. Teoria da Relatividade.

Brasília, DF
Junho de 2025

ABSTRACT

GAGNÉ'S LEARNING HIERARCHIES: A PROPOSAL FOR TEACHING THE THEORY OF SPECIAL RELATIVITY IN HIGH SCHOOL

Giovanni Sesostres Ferreira Ribeiro

Supervisor:
Prof. Doc. Marcello Ferreira

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação da Universidade de Brasília no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

This master's thesis aims to bring the teaching of Modern and Contemporary Physics, commonly neglected in Basic Education, within the reach of high school students. Despite its relevance, the approach to the Theory of Relativity at that level of education is still quite limited. This gap highlights a pedagogical problem: the absence of systematized didactic proposals that help teachers approach Relativity in a structured manner and integrated with the cognitive demands of students. Thus, this research proposes the production, application and evaluation of a didactic sequence referenced in Robert Gagné's Hierarchies of Learning, a model that structures the levels of cognitive complexity in ascending progression and guides the planning of effective instructions, organizing the contents according to hierarchical levels of learning. First, an analysis of Gagné's theory was made in order to investigate how this contribution could support the hierarchical development of the processes and contents made available to students, with the objective of achieving the skills and storing them in long-term memory. The application was carried out with a third-year high school class from the public school system in the Federal District. The classes were organized into three modules: 1. Galileo's Classical Relativity (two classes); 2. Theory of Special Relativity (four classes); 3. Theory of General Relativity (four classes). The application strategies included lectures, multimedia projections, experimental approaches, group discussions, and resolution of proposed questions. During the application, it was noted that there were clearly no prerequisites, ranging from a lack of knowledge of basic mathematics to the fact that no student had knowledge of wave phenomena. These aspects led to many absences by the students in the application of the didactic sequence, in addition to producing difficulties in the application – which, however, were mitigated by the strategies employed. The results of this process were constructed through the analysis of the

records prepared by the teacher and the students' productions. From this, we found engagement and substantial evidence of higher-order learning by those who participated fully, and partial learning by the others. In this sense, the proposal of the didactic sequence proved to be viable for application in the group of students researched, incorporating relevant contributions to the teaching and learning processes.

Keywords: Teaching Modern and Contemporary Physics. Learning hierarchies. Theory of Relativity.

Brasília, DF
June 2025

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. O modelo básico de aprendizagem e memorização	8
Figura 2. As fases sequenciais dos eventos de aprendizagem.....	10
Figura 3. Sequência temporal dos eventos da lição.....	24
Figura 4. As transformadas de Galileu	28
Figura 5. Barco a favor da correnteza	29
Figura 6. Barco contra a correnteza	29
Figura 7. Barco perpendicular a correnteza	29
Figura 8. Barco diagonalmente a correnteza	29
Figura 9. Difração de ondas	30
Figura 10. Padrão de interferências	31
Figura 11. Inteferômetro.....	32
Figura 12. Relatividade especial: Dilatação dos tempos	36
Figura 13. Relatividade especial: Contração dos comprimentos.....	38
Figura 14. Relatividade geral: Princípio da equivalência	40
Figura 15. Relatividade geral: Deformação do espaçotempo	42
Figura 16. Relatividade geral: Eclipse Solar: Sobral – CE	44
Figura 17. Relatividade geral: Eclipse Solar: trajetória da luz	44
Figura 18. Relatividade geral: Horizonte de eventos	44
Figura 19. Éter luminífero.....	51
Figura 20. Tecido espaçotempo.....	59
Figura 21. Deformação do espaçotempo.....	59
Figura 22. Efeito da deformação Espaçotempo.....	60
Figura 23. Primeira resposta para questão 1 do primeiro questionário.....	70
Figura 24. Segunda resposta para questão 1 do primeiro questionário.....	71
Figura 25. Primeira resposta para questão 2 do primeiro questionário.....	71
Figura 26. Segunda resposta para questão 2 do primeiro questionário.....	71
Figura 27. Primeira resposta para questão 3 do primeiro questionário.....	72
Figura 28. Segunda resposta para questão 3 do primeiro questionário.....	72
Figura 29. Primeira resposta para questão 1 do módulo 1 (individuais1)	73

Figura 30. Segunda resposta para questão 1 do módulo 1 (individuais1)	73
Figura 31. Primeira resposta para questão 2 do módulo 1 (individuais1)	74
Figura 32. Segunda resposta para questão 2 do módulo 1 (individuais1)	74
Figura 33. Primeira resposta para questão 3 do módulo 1 (individuais1)	75
Figura 34. Segunda resposta para questão 3 do módulo 1 (individuais1)	75
Figura 35. Primeira resposta para questão 4 do módulo 1 (individuais1)	75
Figura 36. Segunda resposta para questão 4 do módulo 1 (individuais1)	76
Figura 37. Primeira resposta para questão 1 do segundo questionário.....	77
Figura 38. Segunda resposta para questão 1 do segundo questionário.....	77
Figura 39. Primeira resposta para questão 2 do segundo questionário.....	77
Figura 40. Segunda resposta para questão 2 do segundo questionário.....	77
Figura 41. Primeira resposta para questão 3 do segundo questionário.....	78
Figura 42. Segunda resposta para questão 3 do segundo questionário.....	78
Figura 43. Primeira resposta para questão 4 do segundo questionário.....	78
Figura 44. Segunda resposta para questão 4 do segundo questionário.....	79
Figura 45. Primeira resposta para questão 2 do módulo 2(individuais2).....	79
Figura 46. Segunda resposta para questão 2 do módulo 2(individuais2).....	80
Figura 47. Primeira resposta para questão 3 do módulo 2(individuais2).....	80
Figura 48. Segunda resposta para questão 3 do módulo 2(individuais2).....	81
Figura 49. Primeira resposta para questão 1 do terceiro questionário.....	82
Figura 50. Segunda resposta para questão 1 do terceiro questionário.....	82
Figura 51. Primeira resposta para questão 2 do terceiro questionário.....	82
Figura 52. Segunda resposta para questão 2 do terceiro questionário.....	83
Figura 53. Primeira resposta para questão 3 do terceiro questionário.....	83
Figura 54. Segunda resposta para questão 3 do terceiro questionário.....	83
Figura 55. Primeira resposta para questão 1 do módulo 2(individuais3).....	84
Figura 56. Segunda resposta para questão 1 do módulo 2(individuais3).....	85
Figura 57. Primeira resposta para questão 2 do módulo 2(individuais3).....	85
Figura 58. Segunda resposta para questão 2 do módulo 2(individuais3).....	85
Figura 59. Primeira resposta para questão 3 do módulo 2(individuais3).....	86
Figura 60. Segunda resposta para questão 3 do módulo 2(individuais3).....	86

Figura 61. Resposta para questão 1 do quarto questionário	
87	
Figura 62. Resposta para questão 2 do quarto questionário.....	
87	
Figura 63. Resposta para questão 3 do quarto questionário.....	87
Figura 64. Resposta para questão 4 do quarto questionário	
88	
Figura 65. Resposta para questão 1 do módulo 3 (individuais 4)	
88	
Figura 66. Resposta para questão 2 do módulo 3 (individuais 4)	
89	
Figura 67. Resposta para questão 3 do módulo 3 (individuais 4)	
89	
Figura 68. Resposta para questão 1 do quinto questionário	
90	
Figura 69. Resposta para questão 2 do quinto questionário.....	
90	
Figura 70. Resposta para questão 3 do quinto questionário.....	
90	
Figura 71. Resposta para questão 1 do módulo 3 (individuais 5)	
91	
Figura 72. Resposta para questão 2 do módulo 3 (individuais 5).....	
91	
Figura 73. Resposta para questão 3 do módulo 3 (individuais 5).....	
92	
Figura 74. Resposta para questão 4 do módulo 3 (individuais 5).....	
92	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Números de ausências dos estudantes nas aplicações.....	63
Tabela 2. Menções do questionário em grupo 1: Módulo 1 (aulas 1 e 2).....	70
Tabela 3. Menções das questões 1: Módulo 1 (aulas 1 e 2).....	73
Tabela 4. Menções do questionário em grupo 2: Módulo 2 (aulas 3 e 4).....	76
Tabela 5. Menções das questões 2: Módulo 2 (aulas 3 e 4).....	79
Tabela 6. Menções do questionário em grupo 3: Módulo 2 (aulas 5 e 6).....	81
Tabela 7. Menções das questões 3: Módulo 2 (aulas 5 e 6).....	84
Tabela 8. Menções do questionário em grupo 4: Módulo 3 (aulas 7 e 8).....	86
Tabela 9. Menções das questões 4: Módulo 3 (aulas 7 e 8).....	88
Tabela 10. Menções do questionário em grupo 5: Módulo 3 (aulas 9 e 10).....	89
Tabela 11. Menções das questões 5: Módulo 3 (aulas 9 e 10).....	91
Tabela 12. Número de respostas avaliadas em cada nível.....	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Trabalhos correlatos à Teoria de Gagné	4
Quadro 2 – Planejamento de ensino para cursos e os resultados esperados.....	22
Quadro 3 – Gravidade Newtoniana x Relatividade Geral.....	42
Quadro 4 – Estrutura do produto educacional	46
Quadro 5 – Sequência estrutural do planejamento das aulas.....	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Respostas Avaliadas.....	93
---	-----------

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. A fundamentação da Teoria das Hierarquias de Aprendizagens de Gagné	6
2.1. Um breve relato da trajetória de Robert Gagné	6
2.2. Considerações iniciais sobre os princípios essenciais da aprendizagem	7
2.3. Os processos de aprendizagem	9
2.4. Os resultados da aprendizagem	12
2.5. Condições para a aprendizagem	16
2.6. Planejamento da instrução	20
2.7. Entrega da instrução	24
2.8. Sequência Didática	25
3. A Física em torno das Teorias da Relatividade Especial e Geral	27
3.1. Relatividade clássica	27
3.2. Difração da luz e o experimento de Michelson-Morley.....	30
3.3. Relatividade Restrita e Geral	32
4. Produto Educacional	46
4.1. Planos de aula dos módulos.....	47
4.1.1. Módulo 1 – Relatividade Clássica de Galileu.....	47
4.1.2. Módulo 2 – Teoria da Relatividade Restrita.....	50
4.1.3. Módulo 3 – Teoria da Relatividade Geral.....	57
5. Análise da Aplicação do Produto Educacional.....	63
5.1. Resultados das aplicações das aulas em geral	63
5.2. Análise da Aprendizagem	69
5.3. Resumo dos Dados	92
6. Considerações Finais	94

Referências 96

1. INTRODUÇÃO

A Transição da Relatividade Clássica de Galileu (TRC) para a de Einstein no século XX constitui um dos pontos de inflexão mais significativos da Física Moderna e Contemporânea (FMC). Essas teorias não apenas revolucionaram os conceitos de espaço, tempo e gravidade, como também ampliaram a compreensão da realidade ao propor que espaço e tempo são grandezas interligadas e relativas, desafiando a estrutura absoluta da Física newtoniana. A Teoria da Relatividade Especial (TRE), publicada em 1905, propõe que a velocidade da luz no vácuo é uma constante universal e que os eventos físicos são descritos de maneira distinta por observadores em diferentes referenciais inerciais. Já a Teoria da Relatividade Geral (TRG), apresentada em 1915, reconhece a gravidade como a curvatura do espaço tempo provocada pela presença de massa.

Essas teorias inauguraram modos de perceber o mundo, qualificando elementos centrais da experiência humana, como simultaneidade, duração e posição espacial. A percepção cotidiana, baseada na intuição clássica, é confrontada por fenômenos como a dilatação do tempo e a contração do comprimento — elementos que, ainda que não perceptíveis diretamente, estruturam tecnologias presentes no cotidiano, como o GPS e os sistemas de comunicação por satélite. A TRG, portanto, não apenas desloca a compreensão teórica do universo físico, mas também incide sobre o imaginário contemporâneo e suas formas de representação do real.

Do ponto de vista pedagógico, a Teoria da Relatividade (TR) — especialmente em sua forma especial — mobiliza categorias cognitivas superiores, que vão desde o pensamento abstrato à capacidade de modelização simbólica e à construção de explicações não intuitivas. Ao desnaturalizar noções como tempo absoluto e espaço fixo, o estudo da TR desafia os estudantes a mobilizarem operações mentais complexas, como a análise crítica, a argumentação científica, a abstração matemática e a imaginação teórica. Essas operações são fundamentais para o desenvolvimento de competências cognitivas e epistemológicas no ensino médio. Apesar dessa relevância, a abordagem da TR na Educação Básica brasileira ainda é bastante limitada. A Base Nacional Comum Curricular (BNCC), embora afirme como competência geral a promoção do "pensamento científico, crítico e criativo" (C2) e contenha a habilidade EM13CNT204, que trata das interações gravitacionais no contexto do universo, é omissa quanto à proposição concreta de conteúdos relacionados à FMC. Essa lacuna evidencia um problema pedagógico e curricular: a ausência de propostas didáticas sistematizadas que possibilitem aos docentes abordar a relatividade de forma significativa, estruturada e integrada com as exigências cognitivas dos estudantes do ensino médio.

A presente pesquisa propõe apresentar uma alternativa de ensino da FMC utilizando como ferramenta teórico-metodológica as Hierarquias da Aprendizagem de Gagné, modelo que estrutura os níveis de complexidade cognitiva em progressão ascendente e orienta o planejamento de instruções eficazes. Ao organizar os conteúdos segundo níveis hierárquicos de aprendizagem — da informação verbal à aplicação de habilidades intelectuais complexas —, é possível elaborar propostas de ensino coerentes com os processos mentais exigidos pela TR e com o estágio de desenvolvimento dos estudantes.

Diante disso, a execução dessa aplicação pretende desenvolver, aplicar e avaliar uma sequência didática sobre a TR, fundamentada nas Hierarquias da Aprendizagem de Gagné e apoiada no uso de tecnologias digitais. A proposta busca promover a aprendizagem com retenção na memória de longa duração dos fundamentos da Relatividade, articulando teoria, prática pedagógica e mediação tecnológica.

A TRC é satisfatória em descrever os movimentos relativos de corpos com velocidades baixas, que, em regra, predomina a percepção da humanidade. Porém esbarra em paradoxos quando aplicada aos movimentos dos corpos de velocidades muito altas. A TRE divulgou a ideia de que a velocidade da luz no vácuo é uma constante invariável no universo, contrariando a crença de Galileu de que a velocidade da luz poderia variar de acordo com o movimento da fonte ou do observador. Essa constância da velocidade da luz levou a extensões surpreendentes, como a dilatação do tempo e a contração do comprimento em altas velocidades, fenômenos que foram confirmados posteriormente.

A principal diferença entre as duas teorias está na maneira como tratam o conceito de espaço e tempo. Enquanto Galileu via o espaço e o tempo como entidades separadas e absolutas, Einstein propôs que espaço e tempo são relativos e interligados, formando o que ele chamou de espaçotempo. A transição da TRC para a TRE representou uma mudança de paradigma na física, transformando nossa compreensão do cosmos e da natureza fundamental do universo. A TRE e, posteriormente, a TRG.

A relevância do estudo dos princípios básicos da FMC para que os estudantes do Ensino Médio se apropriem do conhecimento sobre as novas tecnologias, uma vez que essas interferem diretamente sobre a sua vida e pode vir a definir o seu futuro. Portanto, é de extrema importância que a escola tenha em seu currículo aulas sobre os conceitos básicos da FMC e relacione os conteúdos em sala de aula com as tecnologias utilizadas pela sociedade (Moreira, 2011; Ferreira *et al.*, 2021a).

Estudar a Teoria da Relatividade no Ensino Médio é importante por várias razões. Cita-se algumas a seguir:

1. **Ampliação do Horizonte Científico:** A teoria da relatividade é uma das teorias fundamentais da física moderna que revolucionou nossa compreensão do universo. Ao estudá-la, os estudantes têm a oportunidade de expandir seus horizontes científicos e entender como o espaço, o tempo e a gravidade estão interconectados.
2. **Estímulo ao Pensamento Crítico:** Compreender os princípios da teoria da relatividade desafia os estudantes a pensar de maneira crítica e questionar conceitos estabelecidos. A teoria de Einstein muitas vezes desafia nossa intuição, incentivando os estudantes a desenvolverem habilidades analíticas e argumentativas.
3. **Aplicação Prática:** Embora a teoria da relatividade possa parecer complexa, seus princípios têm aplicações práticas em tecnologias modernas, como GPS, imagens médicas e astronomia. Compreender essas aplicações ajuda os estudantes a conectarem a teoria à sua relevância no mundo real.
4. **Preparação para Estudos Futuros:** Para os estudantes que desejam seguir carreiras em áreas científicas, tecnológicas ou de engenharia, o estudo da teoria da relatividade no ensino médio pode ser um trampolim para estudos superiores mais aprofundados em física e disciplinas relacionadas.
5. **Desenvolvimento do Pensamento Abstrato:** A teoria da relatividade exige que os estudantes trabalhem com conceitos abstratos e imaginem realidades não intuitivas. Isso ajuda no desenvolvimento de habilidades de pensamento abstrato e na capacidade de visualizar e compreender conceitos complexos.

Em síntese, estudar a TR no Ensino Médio não apenas amplia o conhecimento científico dos estudantes, mas também promove pensamento crítico, aplicação prática, preparação para estudos futuros e desenvolvimento de habilidades cognitivas fundamentais. É uma oportunidade valiosa para imersão numa das teorias mais fascinantes e impactantes da FMC.

O ensino médio, etapa final da educação básica, com duração mínima de três anos, terá como finalidades: A consolidação e o aprofundamento dos conhecimentos adquiridos no ensino fundamental, possibilitando o prosseguimento de estudos e a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina. (LDB, 1996)

Do ponto de vista das normas curriculares oficiais, o Ministério da educação, ao elaborar a Base Nacional Comum Curricular. BNCC¹ (Brasil, 2018) tem entre suas competências e habilidades:

C2: Pensamento Científico, Crítico e Criativo – Exercitar a curiosidade intelectual e recorrer à abordagem própria das ciências, incluindo a investigação, a reflexão, a análise crítica, a imaginação e a criatividade, para investigar causas, elaborar e testar hipóteses, formular e resolver problemas e criar soluções (inclusive tecnológicas) com base nos conhecimentos das diferentes áreas.

EM13CNT204: Elaborar explicações, previsões e cálculos a respeito dos movimentos de objetos na Terra, no Sistema Solar e no Universo com base na análise das interações gravitacionais, com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais (como *softwares* de simulação e de realidade virtual, entre outros) (Brasil, 2018).

A BNCC assevera a necessidade da construção de sequências didáticas – como proposto em Ferreira e Silva Filho (2018) – que estejam disponíveis aos professores de Física do Ensino médio para utilizar como referência no planejamento das aulas de FMC.

A fim de inserir o presente trabalho dentro do panorama recente das pesquisas acadêmicas no Brasil, especialmente no que concerne ao Ensino de Física, as aplicações das Hierarquias de Aprendizagem de Robert Gagné e as aprendizagens com metodologias ativas de Ensino, dentro de uma perspectiva do planejamento instrucional, da motivação e da organização de objetivos de aprendizagem, realizou-se um levantamento em bancos de dados acadêmicos e institucionais, como o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), o repositório da Sociedade Brasileira de Física (SBF) e o do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) dos trabalhos publicados ou defendidos nos últimos cinco anos, no período de maio de 2021 a maio de 2025. A busca foi realizada em maio de 2025 com os operadores “Física”, “Ensino de Física”, “Gagné” e “hierarquia(s) de aprendizagem”, admitindo trabalhos em português, podendo ser dissertações, teses ou artigos científicos.

O quadro 1, a seguir, resume os principais trabalhos localizados que dialogam diretamente ou tangencialmente com a proposta teórico-metodológica adotada nesta dissertação:

Quadro 1. Trabalhos correlatos ao uso da teoria de Gagné no Ensino de Física

Título	Autores (Instituição)	Ano	Descrição
Simuladores digitais no contexto epistemológico de Gagné e Vygotsky: uma proposta de	Ferreira <i>et al.</i> (UnB)	2021	Apresenta uma proposta de ensino com uso de simuladores digitais, fundamentada nos modelos teóricos de Gagné e Vygotsky.

¹ A BNCC foi homologada em 2017 (para Educação Infantil e Ensino Fundamental) e em 2018 (para o Ensino Médio), alinhada à Lei de Diretrizes e Bases da Educação (LDB, Lei nº 9.394/1996) e ao Plano Nacional de Educação (PNE, 2014-2024).

intervenção didática sobre eletricidade e circuitos elétricos			
Aprendizagem cooperativa no Ensino de Física: um estudo de caso com professores de educação básica do Ceará	Sousa (UEPB)	2020	Investiga abordagens didáticas cooperativas alinhadas a fundamentos das teorias da aprendizagem.
Aprendizagem baseada em problemas no ensino de Física: uma proposta para o ensino da Relatividade	Ferreira (UEPB)	2022	Desenvolve uma sequência didática sobre Relatividade utilizando a metodologia de ABP.
Proposta didática de Astronomia no Ensino Médio na epistemologia hierárquica de Gagné	Ferreira <i>et al.</i> (UnB)	2023	Relata e discute proposta didática sobre Astronomia, com base na epistemologia de aprendizagem hierárquica de Robert Gagné.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Percebe-se que, ao analisar esses trabalhos, embora a teoria de Gagné ainda seja pouco utilizada de forma sistematizada no Ensino de Física, especialmente no Ensino Médio, há um crescente interesse em abordagens que priorizam o planejamento instrucional estruturado, a mediação pedagógica consciente e o desenvolvimento progressivo das habilidades cognitivas dos estudantes. Isso reafirma a relevância da presente proposta, que ao adotar integralmente a estrutura das Hierarquias da Aprendizagem do autor citado, busca contribuir para preencher essa lacuna na literatura e na prática docente referente aos temas de FMC.

Para cumprir seus objetivos, esta dissertação está organizada da seguinte maneira: a introdução que apresenta a problemática da ausência de um currículo que contemple o ensino de FMC no Ensino Médio. No segundo capítulo, apresenta-se o referencial teórico, com destaque para a teoria das hierarquias de aprendizagem de Gagné e suas implicações didáticas. O terceiro traz uma síntese dos tópicos de Física pertinentes ao conteúdo da TR. No quarto capítulo, é descrito o produto educacional desenvolvido: uma sequência didática estruturada em três módulos, com base nos princípios da aprendizagem e nas etapas cognitivas propostas por Gagné. O quinto relata os resultados da aplicação da sequência didática em sala de aula, analisando os dados obtidos a partir de questionários e observações. Por fim, o sexto apresenta as considerações finais, discutindo os limites, as contribuições e as perspectivas futuras desta pesquisa.

2. A FUNDAMENTAÇÃO DA TEORIA DAS HIERARQUIAS DE APRENDIZAGENS DE GAGNÉ

A Teoria das Hierarquias de Aprendizagem, proposta por Robert Gagné, estabelece que a aquisição de conhecimentos ocorre de forma sequencial e cumulativa, organizada em oito tipos de aprendizagem dispostos em uma hierarquia de complexidade crescente. Esses níveis vão desde respostas simples a estímulos até habilidades cognitivas avançadas passando por discriminações, conceitos, regras e princípios. Gagné argumenta que cada nível serve como pré-requisito para o seguinte, e que o ensino deve ser planejado para garantir o domínio de cada etapa antes de avançar. Essa abordagem enfatiza a importância de uma estruturação lógica e adaptada ao desenvolvimento do aprendiz, com foco na transferência e aplicação prática do conhecimento.

2.1. Breve relato da trajetória de Robert Gagné

Robert Gagné é um teórico da aprendizagem que se identifica com ideias do behaviorismo (comportamentalismo) e do cognitivismo. Admite situações de aprendizagem geradas por estímulos e respostas e, por outro lado, em processos internos da aprendizagem.

Gagné nasceu em 1916, em North Andover, Massachusetts, Estados Unidos. Obteve seu bacharelado em Psicologia na Universidade de Yale em 1937 e, em 1940, seu doutorado também em Psicologia pela Universidade de Brown. Lecionou em Connecticut College for Women entre os anos de 1940 e 1949 e, em seguida, na Universidade Penn State entre 1945 e 1946. No período de 1949 a 1958, foi diretor do laboratório de habilidades motoras e perceptivas da US Air Force.

Contemporâneo de figuras como B.F. Skinner e Jerome Bruner, Gagné manteve os pés fincados no rigor metodológico do behaviorismo — especialmente na análise de estímulos e respostas — enquanto integrava princípios cognitivistas, como a organização hierárquica da aprendizagem e a importância dos processos mentais internos. Sua teoria das "Condições de Aprendizagem" reflete essa síntese, ao propor que a aprendizagem ocorre em etapas sequenciais, desde comportamentos simples até a solução de problemas complexos, mediados por instrução sistemática.

O objetivo central de Gagné era otimizar o ensino por meio de um modelo que articulasse estímulos externos como reforço e prática com processos cognitivos como assimilação e retenção. Suas ideias tiveram consequências duradouras: revolucionaram o design instrucional, influenciando a criação de materiais pedagógicos estruturados e a formação de professores, além de pavimentar o caminho para abordagens posteriores, como a aprendizagem baseada em competências. Seu legado permanece na educação contemporânea, equilibrando behaviorismo e cognitivismo em uma estrutura prática e aplicável.

2.2. Considerações iniciais sobre os princípios essenciais da aprendizagem em Gagné

O comportamento humano se desenvolve em uma sociedade complexa. O homem se estabelece no meio social convenientemente a partir de processos de crescimento em que desenvolve habilidades, apreciações e raciocínios, bem como esperanças, aspirações, atitudes e valores.

O desenvolvimento humano, em todas as suas manifestações, deve depender de dois fatores: crescimento e aprendizagem. Os fatores que influenciam o crescimento são, em larga escala, biologicamente determinados, enquanto os fatores que atuam na aprendizagem são determinados, principalmente, por acontecimentos que pertencem ao meio ambiente do indivíduo (Gagné, 1976).

Para Gagné, a aprendizagem e seus processos se realizam na estrutura cognitiva do indivíduo, o que o distancia de perspectivas behaviorista, as quais, na apreciação do binômio estímulo-resposta, não admitem relevante, como modelo explicativo do comportamento respondente, o construto “mente” (Ferreira *et al.*, 2023).

As condições de aprendizagem são identificadas nas situações cotidianas, inclusive na escola. A aprendizagem traz modificações de caráter permanente no comportamento humano que não podem ser atribuídas ao processo de crescimento. As modificações dão ao indivíduo um acréscimo permanente na sua capacidade de realizar determinadas atividades.

A aprendizagem é uma mudança de estado interior que se manifesta por meio da mudança de comportamento e na persistência dessa mudança. Um observador externo pode reconhecer que houve aprendizagem quando observa a ocorrência de uma mudança comportamental e a permanência desta mudança (Gagné, 1980).

Os processos de aprendizagem têm como elementos a pessoa que aprende, os fatores que estimulam os órgãos sensoriais e a atividade resultante da estimulação (resposta). A habilidade aprendida nesse processo mais simples é chamada de associação.

Para Gagné, a aprendizagem se realiza “*dentro da cabeça*” (em referência ao mentalismo) do indivíduo, além de destacar a importância das teorias de aprendizagem, ressaltando a chamada “*teoria de processamento da informação*”, apresentando e discutindo um modelo básico de aprendizagem e memória como consequência. Esse título à sua teoria se relaciona ao fato de que os processos de aprendizagem são determinados por transformações de “insumos” ou *inputs* (estímulos, informações ou recursos externos fornecidos para facilitar a aprendizagem) para “exumos” ou *outputs* (respostas ou comportamentos observáveis após o processamento dos insumos), analogamente às operações de um computador.

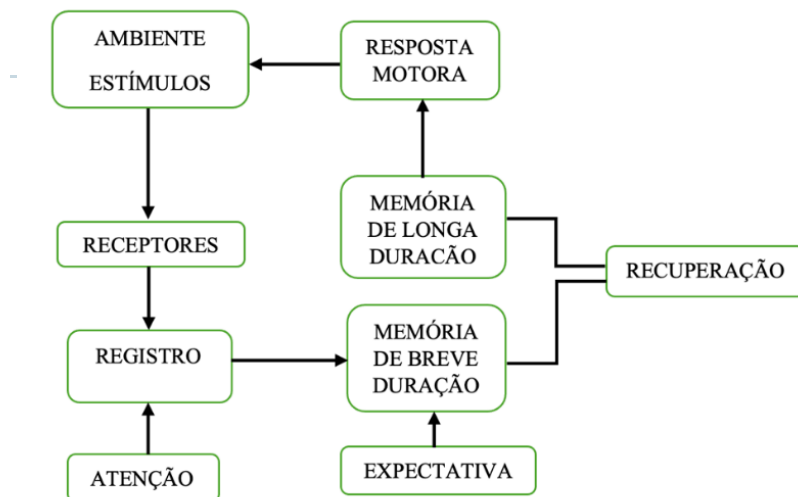
Alguém em situação de aprendizagem recebe uma estimulação por meio de um de seus sentidos e a transforma em mensagem neural que passa por processos de transformações internas até que seja armazenada, podendo ser posteriormente lembrada. Este resultado sofre novas transformações que controlam ações musculares.

O resultado pode ser um discurso ou um movimento qualquer que demonstre que o desempenho foi atingido satisfatoriamente. Esse fluxo de informação pressupõe que:

A estimulação proveniente do ambiente do aprendiz afeta seus receptores e entra no sistema nervoso, através de um registrador sensorial. Esta é a estrutura responsável pela recepção inicial dos objetos e eventos que o aluno vê, ouve, ou que por outro lado sente. A informação é “codificada” no registrador sensorial e numa fração de segundos entra na memória de breve duração sofrendo nova codificação e adquire forma conceitual. Quando a informação é lembrada sofre nova transformação e entra na memória de longa duração onde é armazenada para posterior rememoração. A maioria das teorias atestam que o armazenamento na memória de longa duração é permanente (Gagné, 1980, p. 14-16).

O diagrama a seguir representa um modelo básico de aprendizagem nessa perspectiva.

Figura 1. O modelo básico de aprendizagem e memorização proposto nas teorias modernas de processamento da informação.



Fonte: Elaboração própria (2025).

O fluxo de informações traduz um modelo de aprendizagem que passa por controle que determinará as transformações que a informação sofre. Os aspectos referentes às estruturas de controle executivo e expectativas (as ditas estratégias cognitivas) que influenciam de maneira crítica na aprendizagem serão destacados posteriormente.

Num programa educacional, o professor desempenha papel central. Sem desconsiderar a relevância do estudante, é dever daquele promover a aprendizagem ministrando os eventos planejados para iniciar, ativar e fazer com que os temas aprendidos sejam duradouros. Ainda com relação à instrução e ao papel do professor, por se tratar de uma teoria que prevê mudança

comportamental persistente, a fase da aprendizagem existe de um ou mais processos internos, no sistema nervoso central do indivíduo, que transformam a informação até que se possa observar um adequado desempenho. Tais processos internos podem ser influenciados por eventos extrínsecos, isto é, por estimulação do ambiente.

Conhecimentos empregados pelos docentes necessitam de sólido embasamento em teorias de aprendizagem para que produtos educacionais aplicados com estudantes tenham maior probabilidade de êxito. Nessa premissa, faz-se necessário percorrer uma sequência, envolvendo: levantamento de conhecimentos prévios; estabelecimento de conteúdo, problema investigativo e objetivos instrucionais; materiais, métodos e procedimentos didáticos; instrumentos e indicadores de avaliação e referências ampliativas (Ferreira; Silva Filho, 2019; Ferreira *et al.*, 2020). No caso de que cuida esta pesquisa, destaca-se a importância da identificação, por parte do professor, de elementos motivadores adequados à introdução de conhecimentos em TRE para estudantes do Ensino Médio.

O segundo passo é a administração da instrução que será conduzida pela teoria de aprendizagem abordada. Ela é o modelo explicativo fornecerá o conhecimento de quais alternativas são possíveis e como elas poderão ser experimentadas para promover a aprendizagem desejada (Gagné, 1980).

Finalmente, a avaliação trará os meios (instrumentos e indicadores) que possibilitam comparar aquilo que foi aprendido com o que se esperava que aprendesse. Espera-se, ao final da aplicação deste produto educacional, que os estudantes sejam capazes de discutir apropriadamente os conhecimentos básicos de FMC no que diz respeito aos princípios da TRE, além dos demais tópicos elencados nos objetivos gerais propostos.

2.3. Processos de aprendizagem em Gagné

A aprendizagem era anteriormente reconhecida como o resultado da interação do indivíduo com o seu ambiente e que ela ocorria quando ficava evidente a mudança de desempenho a partir de um evento.

Eventos que propiciam a aprendizagem podem ser externos, isto é, que atingem os estudantes por meio da estimulação, ou internos e inferidos de observações externas de processos que ocorreram no sistema nervoso central. Tais processos são tidos como ponto de transição entre o conhecimento e a cognição, configurando o que Gagné trata de incidente essencial da aprendizagem. A sucessão de processos de acordo com as fases previstas por Gagné está registrada na Figura 2.

Figura 2. Oito fases sequenciais de eventos que constituem um ato de aprendizagem.

FASE	PROCESSO
Motivação	Expectativa
Apreensão	Atenção
Aquisição	Codificação
Retenção	Armazenamento na memória
Rememoração	Recuperação
Generalização	Transferência
Desempenho	Resposta
Feedback	Reforço

TEMPO

Fonte: Adaptado de Gagné (1980, p. 28).

2.3.1. Fase de motivação

A fase da motivação estabelece a preparação para um ato de aprendizagem. Dentre as formas de motivação relevantes para a apreensão da aprendizagem, tem-se a motivação por incentivo em que o indivíduo se esforça para atingir uma meta proposta. O indivíduo sente-se recompensado e justifica a motivação necessária para se dedicar à aprendizagem quando é capaz de completar, com êxito, as etapas de apropriação de um tema como o da TRE e, em decorrência, deter a compreensão básica de fenômenos da FMC, habilitando-se a discutir com embasamento, opinar, criticar e extrapolar contextualmente a compreensão.

A motivação por expectativa é uma alternativa que pode suprir o caso da não efetividade da motivação por incentivo. Trata-se da antecipação da recompensa que cada indivíduo obterá quando atingir determinada meta (Gagné, 1980). Pode-se dizer, por exemplo, que o estudante será capaz de interpretar a TRE ao término da apresentação da sequência didática e interpretar o espaçotempo sob um ponto de vista inovador, jamais por ele imaginado.

2.3.2. Fase de apreensão

Levando-se em conta que a fase da motivação foi cumprida com sucesso, um estímulo chegará ao estudante que, atento ao que é relevante ao seu propósito de aprendizagem, de alguma maneira, a converterá no incidente essencial para armazenamento em sua memória. Uma vez estabelecido o processo de atenção, um conjunto mental é ativado por estimulação externa, passando a exercer um tipo de controle executivo que persistirá por um período limitado, alertando o indivíduo para receber certos tipos de estimulações (Gagné, 1980).

O professor pode usar estratégias que estimulem a atenção dos estudantes como alteração gestual, mudança de entonação na voz, linguagem informal, entre outras possibilidades. Inicia-se, então, a percepção dos estímulos por parte do indivíduo que seleciona os aspectos que incorrerão nos seus objetivos de aprendizagem. Os conhecimentos prévios do estudante conduzem a seleção daquilo que deve ser percebido para a aquisição da meta de aprendizagem. Aqueles bem preparados tendem a ser autônomos e controladores de seus processos de atenção.

2.3.3. Fase de aquisição

A aquisição é a etapa em que o incidente essencial da aprendizagem entra na memória de breve duração para ser, mais tarde, transformado em um estado persistente na memória de longa duração (Gagné, 1980).

Estudos demonstram que aquilo que é lembrado por um indivíduo quase nunca é o mesmo em relação à estimulação original que ocasionou a aprendizagem. Portanto, aparentemente, há uma transformação da informação percebida para uma forma que é mais facilmente armazenada – evento denominado de codificação. Nele, o que é aprendido pode sofrer simplificações ou adornos em relação ao que foi apresentado, remetendo à ideia dos conhecimentos prévios. A codificação ocorre também quando algo que foi aprendido entra na memória de longa duração, tornando-se assim mais memorável. Nesse caso, o papel do professor é fundamental ao trazer estímulos que auxiliem na retenção do que foi aprendido.

No que diz respeito ao aprendizado dos princípios da TRE, é fundamental relacionar o conteúdo com o máximo possível de exemplificações de ocorrência dos fenômenos apresentados.

2.3.4. Fase de retenção

Na retenção, o conhecimento será codificado para a memória de longa duração. Esta é a fase de aprendizagem a respeito da qual conhecemos menos, porque é menos acessível à investigação (Gagné, 1980).

A memória de longa duração pode estar sujeita a um gradual enfraquecimento com a passagem do tempo e ao fenômeno da interferência. Novas informações recebidas pela memória de longa duração podem enfraquecer informações antigas. Entretanto, não há indicação científica de limite de espaço da memória de longa duração que aparentemente é ilimitada.

2.3.5. Fase de rememoração

O processo de rememoração consiste em associar a informação acolhida nas memórias de longa e curta duração a alguma pista que permita a recuperação e, posteriormente, a qualificação do

que foi aprendido. Dessa maneira, o que foi armazenado fica mais acessível. As pistas para recuperação parecem ser mais eficazes quando introduzidas quando a aprendizagem ocorre pela primeira vez (Gagné, 1980).

Indivíduos que apresentam mais facilidades em aprender conseguem suprir suas próprias pistas para recuperação. Embora seja importante que o professor planeje o provimento para ativar externamente a memória de seus estudantes, deve sempre perseguir a meta de torná-los crescentemente independentes.

2.3.6. Fase de generalização

A generalização trata-se da capacidade de recuperar aquilo que foi aprendido em contextos distintos do que originalmente ocorreu no ato da aprendizagem. A lembrança do que foi aprendido e sua aplicação a novos e diferentes contextos se dá o nome de transferência da aprendizagem, geralmente abreviado por transferência (Gagné, 1980).

Fenômenos relacionados à teoria da relatividade geral para corpos acelerados num contexto de forças de contato devem ser associados ao campo gravitacional levando a conclusões semelhantes. Espera-se que os estudantes que tenham aprendido sobre o princípio da teoria da relatividade geral sejam capazes de realizar a transferência.

2.3.7. Fase de desempenho e feedback

Nesta fase, o estudante é avaliado respondendo sobre o que aprendeu, de modo a demonstrar ao professor que seu comportamento foi modificado e, por consequência, houve aprendizagem daquilo a que se propôs. Ao tomar conhecimento de seus resultados, tem a oportunidade de refletir acerca deles.

Entretanto, para se ter resultados de aprendizagem convincentes, o estudante necessita demonstrar, a partir de exemplos variados, capacidade de generalização. Nesse sentido, faz-se necessário avaliar o máximo de situações em que a capacidade de transferência de aprendizagem acerca do que foi proposto inicialmente fique bem evidenciada.

O *feedback* informativo é o que muitos teóricos da aprendizagem consideram a essência do reforço. O reforço funciona na aprendizagem humana porque a expectativa estabelecida durante a fase de motivação é agora confirmada durante a fase de devolutivas (Gagné, 1980).

2.4. Os resultados da aprendizagem

Como visto, a aprendizagem é ativada por diversas estimulações advindas do ambiente. Ao verificar a alteração persistente do comportamento de um indivíduo que demonstra desempenhos satisfatórios em função da capacitação experimentada, verifica-se também a consolidação do ato de aprendizagem.

Os resultados de aprendizagem, então, são capacidades humanas que tornam possível uma variedade de desempenhos (Gagné, 1980). Cabe, para efeitos didáticos, estabelecer categorias de capacidades que apresentem propriedades comuns. A distinção de capacidades humanas traz a possibilidade de aprimoramento do processo de aprendizagem e, posteriormente, induz caminhos para o planejamento das instruções.

Existem cinco categorias principais de resultados de aprendizagem, isto é, de capacidades humanas aprendidas: 1) informação verbal; 2) habilidades intelectuais; 3) estratégias cognitivas; 4) atitudes; e 5) habilidades motoras (Gagné, 1980; Ferreira *et al.*, 2021b; Ferreira *et al.*, 2023). Passa-se à descrição de cada resultado.

2.4.1. Informação verbal

É o processo transmissão fundamental do conhecimento sobre eventos históricos, tradições acumuladas de gerações passadas, cultura, civilizações retratadas das mais diversas formas de comunicação como literatura, arte, afazeres práticos da vida, apreendidas por meio de comunicações verbais, orais ou escritas (Gagné, 1980).

A informação verbal permeia a maior parte deste produto educacional, visto que todo material acerca da TRE aqui utilizado vem de livros e artigos correlatos. Dessa maneira, os estudantes deverão demonstrar a capacidade de enunciar de maneira proposicional o conteúdo aprendido. O estudante capacitado poderá enunciar o que aprendeu de forma original, isto é, com suas próprias palavras.

Aparentemente, as informações verbais podem ser armazenadas na memória do como uma imagem visual. A recuperação de informações é orientada por pistas não verbais, como por imagens ou gráficos.

O conhecimento pode ser definido como o conjunto organizado de informações cujas palavras trazem algum significado para alguém. A aprendizagem de conceitos tem estreita relação com a informação verbal e será detalhada posteriormente.

2.4.2. Habilidades Intelectuais

São habilidades que distinguem o *saber como* do *saber o quê* da informação. Saber concordar verbos com sujeitos, regras matemáticas, aplicar os princípios da relatividade em situações que a mecânica clássica diverge do senso comum. Não há como aprender esse tipo de habilidade na modalidade de informação verbal devido à enorme variedade de casos.

As habilidades intelectuais podem ser divididas em categorias por ordem de complexidade. Seguindo essa ordem, tem-se: discriminações, conceitos, regras e regras de ordem superior. As primeiras habilidades são sucessivamente pré-requisitos das seguintes – daí a lógica da hierarquização.

Discriminações são habilidades que permitem distinguir características próprias de cada objeto ou símbolo. Sons, cores, formas são apreendidas por uma criança antes que ela comece a falar e sempre aumentam à medida que são expostas a novas experiências. Deve-se salientar que a aprendizagem de discriminações é outro nome para aprendizagem perceptiva mencionada anteriormente.

Logo após o indivíduo ter a disposição discriminações, como pré-requisito, estará apto a aprender conceitos. Conceitos podem ser concretos na mais simples expressão. Eventos, qualidades de objetos ou os próprios objetos são classificados pelos indivíduos que atingiram este tipo de habilidade intelectual. A aquisição de um conceito concreto capacita a identificar uma classe inteira de coisas, indicando um ou mais exemplos da classe (Gagné, 1980).

Conceitos definidos não podem simplesmente ser identificados por indicações. Necessitam de uma sentença para que se possa identificar classes de eventos ou coisas que se assemelham. Por exemplo, o conceito de velocidade pode ser obtido concretamente pela ideia de *rápido* ou *lento*; porém, necessita da definição da derivada do espaço em relação ao tempo para que fique formalmente definido. É adquirido quando um estudante passa demonstrar, ou mostrar, como utilizar a definição.

O conceito definido é, na verdade, uma regra classificadora. A partir dela, estabelece-se a maneira de identificar as classificações. Regras são capacidades que, quando aprendidas, dão ao indivíduo a competência de solucionar algum problema ou desenvolver uma ideia usando símbolos. Por meio de regras, o estudante torna-se apto a solucionar equações, estabelecer relações de espaço e tempo, massa e aceleração.

As regras, como capacidades aprendidas, tornam possível que o indivíduo responda uma classe de coisas com uma classe de desempenhos (Gagné, 1980). Regras de ordem superior são mais complexas. Usualmente, são utilizadas como capacidade quando reúnem regras mais complexas pela combinação de outras mais simples ou até mesmo de conceitos definidos.

A aplicação deste produto educacional segue hierarquicamente a ideia de partir de capacidades mais simples, tais como: discriminações em termos do movimento dos corpos, conceitos de velocidade e aceleração e regras do movimento relativo, chegando aos princípios da relatividade especial. Nesse caminho, pretende-se que os estudantes modifiquem seus comportamentos sobre a Física contemporânea até chegar ao ponto de discutirem, com propriedade, acerca da influência da gravidade nas noções de espaçotempo.

2.4.3. Estratégias Cognitivas

São capacidades internamente organizadas das quais o indivíduo faz uso para guiar a própria atenção, a aprendizagem, a memorização e o pensamento, tornando possível o controle executivo (Gagné, 1980). As habilidades intelectuais se dirigem ao ambiente externo do estudante dando-lhe a capacidade de lidar com palavras, números e símbolos enquanto as estratégias cognitivas orientam o comportamento quando lida esse ambiente. Ao empregar as estratégias cognitivas, assume o controle dos processos que envolvem a aprendizagem, a retenção e o pensamento.

As estratégias cognitivas são processos internos que o aprendiz utiliza para controlar e direcionar sua própria aprendizagem, funcionando como mecanismos de autorregulação. Configura como um dos cinco tipos de capacidades aprendidas, ao lado das habilidades intelectuais, informações verbais, atitudes e habilidades motoras. São enfatizadas como: técnicas de memorização, organização de informações ou métodos de resolução de problemas. São ferramentas que permitem ao estudante planejar, monitorar e avaliar seu desempenho. Diferentemente de conteúdos específicos, elas aplicam-se a diversos contextos de aprendizagem.

As estratégias cognitivas estão vinculadas ao processamento de informação, destacando seu papel na aquisição, retenção e transferência do conhecimento. Embora essas estratégias sejam desenvolvidas naturalmente, o ensino explícito delas poderia acelerar e otimizar a aprendizagem. Essa abordagem reflete a visão cognitivista de Gagné, que valoriza os processos mentais internos, mas mantém raízes no behaviorismo ao defender que a prática estruturada e o reforço são essenciais para consolidá-las.

2.4.4. Atitudes

Atitude é uma capacidade aprendida que afeta a escolha que o estudante faz a respeito de uma ação pessoal. Assim, uma escolha de ação pessoal se constitui num estado interno que origina processos de controle executivo (Gagné, 1980).

As atitudes são influenciadas pelo meio ambiente, pela família, por amigos e por professores. Entretanto, são escolhas de ordem pessoal, cabendo sempre a decisão daquilo que será aprendido pelo próprio indivíduo.

Diferentemente de habilidades intelectuais ou informações verbais, as atitudes envolvem componentes afetivos, cognitivos e comportamentais, manifestando-se por meio de preferências, valores e reações emocionais. Gagné destacava que as atitudes são aprendidas e moldadas por experiências diretas, modelagem social e reforço, aproximando-se do behaviorismo em sua ênfase nos estímulos externos. No entanto, incorporava elementos cognitivos ao reconhecer que crenças e avaliações pessoais mediarão esse processo.

Na prática educacional, releva-se a importância de ambientes que cultivem atitudes positivas tão essenciais quanto conhecimentos técnicos para uma formação integral.

2.4.5. Habilidades Motoras

As habilidades motoras, em geral, estão associadas a atividades esportivas ou motoras, tais como: carpintaria, operação de máquinas, desenho, pintura ou escultura, entre outras habilidades manuais. O desempenho de atividades musculares se torna evidente quando o indivíduo demonstra precisão, suavidade, força e sincronia (Gagné, 1980).

As capacidades humanas como resultados de aprendizagem representam a categoria do que é aprendido. Informação verbal, habilidades intelectuais, estratégias cognitivas, atitudes e habilidades motoras são as capacidades humanas a serem aprendidas. A fim de se ter o alcance das metas de aprendizagem, é necessário planejar e conduzir a instrução com plena consciência das diferentes implicações dos resultados de aprendizagem em relação à organização das condições de aprendizagem que veremos a seguir.

2.5. Condições para a aprendizagem

As condições para a aprendizagem são determinadas pelo conjunto de eventos específicos que facilitam os diversos resultados de aprendizagem. Podem constituir o alicerce de uma teoria de instrução que orienta o que o professor planeja e posteriormente aplica como objeto de aprendizagem.

Os objetivos de aprendizagem estão relacionados com os resultados a que se pretende chegar. Definir um objetivo de aprendizagem significa expressar uma das categorias de resultados de aprendizagem em termos de desenvolvimento humano, especificando a situação este deva ser observado (Gagné, 1980).

Uma informação verbal pode ser proposta como objetivo de aprendizagem, como se apresenta a seguir:

(Situação). Apresentada a pergunta: “Quais são os postulados de Einstein para a Teoria da Relatividade Especial?”.

(Desempenho em termos de resultado): “Enuncie os postulados”.

(Ação): “Escreva os postulados”.

Temos, entre parênteses, os objetivos de aprendizagem identificados de uma informação verbal. O núcleo essencial do objetivo da aprendizagem é o verbo em termos do resultado e o seu predicado. Esse verbo identifica o que se aprende com um dos tipos de capacidades descritas anteriormente (Gagné, 1980).

Na atuação dos professores, os enunciados são fundamentos para o planejamento da instrução, para sua ação junto aos estudantes e, posteriormente, para a avaliação. Já para os estudantes, são importantes ferramentas de motivação e de *feedback*. Para a equipe de gestão, são a base do programa educacional. Para a família do estudante, dão o retorno do que têm aprendido (Gagné, 1980).

Para cada capacidade a ser aprendida, pode-se agregar um objetivo de aprendizagem. Em cada caso, pode-se descrever a observação do desempenho em termos da situação de aprendizagem considerada. O mais importante no enunciado do objetivo é o desempenho em termos do resultado. Com esta finalidade, tem-se um verbo adequado a cada capacidade a ser aprendida.

Para a informação verbal, por exemplo, o verbo que fica no núcleo dos objetivos de aprendizagem é enunciar. O desempenho em termos da aprendizagem para a informação verbal é atingido quando o estudante se mostra capaz de enunciar o que foi aprendido. O verbo *demonstrar* tem o mesmo efeito quando a capacidade a ser aprendida é uma regra que, como já visto, está nos degraus das hierarquias de aprendizagem das habilidades intelectuais. O verbo *escolher* indica uma atitude e assim sucessivamente. Verbos que trazem significados semelhantes podem ser usados como substitutos sem prejuízo da elaboração dos objetivos de aprendizagem.

Os objetivos da aprendizagem dão a perspectiva em relação ao que será aprendido. Eles nos impõem a disciplina para que não nos desviemos da finalidade da aprendizagem. Mas, é chegado o momento de considerar quais os meios levarão a estes fins. As próximas seções se dedicam à descrição das condições de aprendizagem para cada resultado pretendido, conforme a aplicação da fase de aprendizagem. Não se deixar de lembrar a importância do verbo em termos do resultado como indicador principal do que se está aprendendo.

2.5.1 *Informação Verbal*

Apreensão: quando o professor apresenta a informação verbal ele deve utilizar formas que despertem a atenção dos estudantes de maneira a conduzi-los à seleção perceptiva. Se a apresentação for oral, deve-se empregar variações na entonação ou no volume, dando-se o devido destaque à informação verbal. No caso de apresentação impressa, a atenção pode ser obtida com ênfase a variações no padrão de escrita ou até mesmo com o uso de cores, sublinhados ou outros elementos da montagem. São elas:

Aquisição: fase crítica da aprendizagem em que a informação será codificada. No sentido mais geral, a codificação é intensificada dentro de um contexto significativo relacionado (Gagné, 1980). Entre os meios utilizados para suprir a codificação, conhecimentos prévios demonstram resultados satisfatórios. São materiais verbais, de conteúdo mais geral, previamente selecionados como lembrete daquilo de que os estudantes já tinham conhecimento. A partir de então, a informação verbal, mais específica, é apresentada como o conteúdo que se tinha por finalidade. Outro meio de auxiliar da codificação da informação verbal é a codificação significativa de nomes e rótulos que consiste em inserir nomes a serem aprendidos dentro de estruturas maiores, como frases contextualizadas. Por fim, as imagens também se revelam um poderoso contexto significativo no auxílio da codificação. Associar uma informação verbal a uma imagem é um processo natural para a memória humana.

Recordação e generalização: eventos externos, ocorridos durante a aprendizagem inicial, determinam o êxito na fase de recuperação e na transferência. Estrategicamente, algumas dicas associadas à informação apresentada são implementadas durante a aprendizagem inicial para que sirvam de atalho durante a recuperação. Da mesma maneira, algumas pistas auxiliam a generalização da informação. A transferência ou aplicação da aprendizagem para situações semelhantes às da informação inicial. Nesse caso, cabe ao professor alimentar suas informações com o maior número possível de contextos durante a aprendizagem.

2.5.2. *Habilidades Intelectuais*

O processo de apreensão se assemelha ao da capacidade anterior. Os demais processos para a aprendizagem de habilidades intelectuais são característicos e suas particularidades estão dispostas a seguir.

Aquisição: uma habilidade intelectual é aprendida quando o estudante é capaz de combinar habilidades mais simples que constam do seu sistema cognitivo. Ao combinar conhecimentos básicos de relatividade clássica com os princípios da relatividade especial, pode-se adquirir a

capacidade de interpretar os ajustes necessários para um movimento sob a perspectiva de referenciais distintos.

A combinação que resulta da aquisição de habilidade intelectual segue a ordem de partir de habilidades intelectuais mais simples, como pré-requisitos, até atingir a aprendizagem de uma habilidade mais complexa. Esse processo de análise revela o que se denomina *hierarquia de aprendizagem*, que corresponde a um mapa das habilidades subordinadas relacionadas com alguma habilidade complexa em particular que vai ser aprendida (Gagné, 1980). Essa noção é fundamental para a compreensão da teoria de Gagné e para as finalidades deste trabalho.

Os eventos principais que influenciam na aprendizagem de habilidades intelectuais são, em primeiro lugar, os pré-requisitos que serão combinados, que serão resgatados da memória de curta duração, e as pistas que indicam a sequência apropriada para que a combinação de habilidades conduza à realização do objetivo final. A necessidade das pistas varia com o grau de complexidade da habilidade a ser aprendida.

Recordação: é natural que os estudantes apresentem dificuldades no processo de recuperação de habilidades intelectuais, mesmo num curto prazo após a aprendizagem. Eles podem sofrer esquecimentos pouco depois de terem aprendido e, assim, faz-se necessário que o professor forneça pistas de maneira semelhante ao que aconteceu na aprendizagem da informação verbal. A recuperação de habilidades intelectuais também pode ser obtida pela realização periódica de aulas de revisão. A prática rotineira de exercícios se mostra bastante eficaz na retenção da habilidade intelectual.

Generalização: é possível distinguir dois tipos de transferências no processo de aprendizagem de habilidades intelectuais: a vertical, que é um efeito natural desse tipo de aprendizagem, em que habilidades mais simples escoram a aprendizagem de habilidades mais complexas; e a lateral, uma habilidade intelectual aprendida pode auxiliar na aprendizagem de outras com algumas características semelhantes. O processo se assemelha com a recuperação, exceto pela necessidade de pistas adicionais para que se possa complementar a generalização.

2.5.3. *Estratégias Cognitivas*

Por se tratar de processos de controle organizados internamente, as estratégias cognitivas apresentam efeitos das condições externas menos influentes. São elas:

Aquisição: as estratégias cognitivas orientam o próprio pensamento dos indivíduos. Os atos de prestar atenção, recordar, pensar e aprender não são aprendidos num determinado momento, como ocorre com as habilidades intelectuais, mas desenvolvidos ao longo da vida dos indivíduos. A

combinação de descrições verbais da estratégia com a prática sistemática de resolução de problemas variados tem mostrado eficácia no desenvolvimento das estratégias cognitivas. Tal método é usado no *Productive Thinking program* – “Programa de Pensamento Produtivo” (Covington *et al.*, 1972)². Nele, os estudantes praticam problemas utilizando uma sequência de instruções num caminho lógico da solução de problemas que são propostos. Nesse caso, a prática conduz ao aprimoramento das estratégias. O professor deve estimular, propondo problemas que desafiem seus estudantes, com a resolução frequente e periódica de problemas variados no assunto desenvolvido e na complexidade.

Feedback: é essencial que os estudantes tenham conhecimento dos resultados no processo de aprendizagem de estratégias cognitivas. Nesse momento, haverá o reforço positivo ao que foi apresentado com sucesso e as críticas daquilo que necessita ser retomado. Cabe salientar que o que deve ser relevante é a criatividade, originalidade e inventividade demonstrada por cada um no desempenho da estratégia cognitiva.

2.5.4. *Atitudes*

As atitudes são capacidades aprendidas pelos indivíduos que influenciam nas escolhas no âmbito das ações de ordem pessoal. Podem ser o resultado direto de experiências exitosas ou de reforços positivos a cerca de um determinado desempenho. Podem também ser o resultado indireto da identificação de um dado modelo humano. São elas:

Motivação: vem da construção de uma expectativa. A curiosidade de um aprendiz pode ser aguçada por procedimentos que tragam boas expectativas. E no decorrer da aplicação de uma lição por meio de um simples lembrete, fará com que tenha sua atenção concentrada no objeto da lição. O modelo humano que desperta a identificação por respeito ou admiração traz ao indivíduo o desejo de comportar-se de maneira semelhante à pessoa admirada, a fim de atingir desempenhos parecidos com o modelo seguido.

Feedback: o conhecimento dos resultados e o reforço positivo são condições imprescindíveis para que ocorra uma mudança de comportamento no que diz respeito a aprendizagem de atitudes. A expectativa, que é ativada durante a fase de motivação, necessita ser confirmada a fim de que se complete o ato de aprendizagem (Gagné, 1980).

2.5.2 *Habilidades Motoras*

² Trata-se de um programa instrucional pioneiro no desenvolvimento do pensamento criativo e resolução de problemas em estudantes. O programa utiliza narrativas ilustradas e exercícios estruturados para treinar habilidades como: Formulação de problemas, geração de hipóteses e avaliação sistemática de soluções.

Habilidades motoras constituem um tipo distinto de resultado de aprendizagem. Elas tornam possível a execução precisa, suave e exatamente sincronizada de desempenhos que envolvam o uso de músculos (Gagné, 1980).

São capacidades adquiridas de executar movimentos físicos precisos, coordenados e eficientes. Diferentemente de reflexos inatos, essas habilidades – como: escrever, nadar ou tocar um instrumento – são aprendidas e aperfeiçoadas por meio da prática sistemática e do feedback. A aquisição de habilidades motoras segue uma sequência hierárquica: desde a fase cognitiva, até a autônoma. Embora sua abordagem mantenha raízes no behaviorismo, com ênfase no reforço e repetição, incorpora elementos cognitivistas ao reconhecer a importância de esquemas mentais e planejamento na execução motora.

2.6. Planejamento da instrução

Dentre as importantes tarefas do professor, destaca-se a de que seja assegurada a aprendizagem dos estudantes com apoio das mais variadas estratégias. Nesse sentido, é imprescindível examinar como os processos de instrução podem ser planejados e examinados, para que se tenham resultados de aprendizagem efetivos.

A instrução conta com dois aspectos para sua total realização: o planejamento da instrução, levando-se em consideração os processos da aprendizagem, e a condução das práticas de ensino (ou a entrega da instrução).

Os professores podem dedicar-se a motivar, a estimular a rememoração ou a qualquer outro tipo de atividade de apoio a aprendizagem. Eles podem comunicar algo verbalmente aos estudantes, demonstrando como fazer algo, expondo algum fenômeno a uma classe, ou comportando-se como modelos humanos, quando agem como juízes de discussões. Assim, além do planejamento que o professor realizou como preparação para a instrução, um grande número de decisões de momento é necessário para que se efetive o processo de entrega da instrução (Gagné, 1980, p. 92).

O planejamento da instrução destaca-se pela sistematização rigorosa e pela hierarquização de objetivos, fundamentais para garantir uma aprendizagem eficaz. Sua abordagem, bem estruturada, deve considerar não apenas os conteúdos, mas também estímulos, sequência didática, pré-requisitos cognitivos e motivacionais que facilitam a aquisição e retenção de conhecimentos. O ensino eficaz exige mais que exposição de conteúdo, demanda um roteiro intencional, alinhado às capacidades humanas de processamento, para transformar informação em competência duradoura.

2.6.1. O planejamento de cursos

Em um curso, tem-se a abrangência de um ou mais conteúdos que, por sua vez, poderão se subdividir em vários tópicos. A organização e planejamento inicia-se por um sumário onde temas mais inclusivos serão desdobrados em tópicos logicamente subordinados, levando-se em consideração uma estrutura temporal que descreva a progressão natural dos eventos envolvidos.

Esses princípios têm intenção de organizar logicamente os conteúdos para obter dos estudantes uma atitude mais favorável.

Indo a encontro do sumário, a definição dos objetivos específicos se realiza de maneira eficaz dentro dos tópicos e das lições. Os aspectos do planejamento que influenciam a aprendizagem são: “a identificação de múltiplos objetivos de aprendizagem e a organização de sequencias de pré-requisitos” (Gagné, 1980, p. 93).

2.6.1.1. Múltiplos objetivos

Ao planejar um curso, espera-se alcançar várias metas de aprendizagem. Neste produto educacional, especificamente, o curso gira em torno dos eventos associados à Teoria da Relatividade, que, para haver sentido, operam no mundo das altas velocidades e no espaçotempo deformado por um intenso campo gravitacional, ficando restrito à realização de experimentos empíricos que justificam os postulados da teoria. As metas de aprendizagem na proposta de hierarquias que se revelam coerentes com o produto educacional aqui proposto são: informação verbal, habilidades intelectuais, estratégias cognitivas, escolha da ação pessoal e habilidade motora. É essencial que, durante o planejamento, se faça a identificação dos objetivos de aprendizagem e a realização apropriada de cada um deles.

Dois tipos de revisão norteiam os procedimentos de planejamento de ensino quanto a identificação e utilização de objetivos de aprendizagem: a observação das características de instrução associadas aos resultados de aprendizagem e a aplicação de uma pergunta relativa ao resultado. O Quadro 2 resume essa compreensão.

Quadro 2. Planejamento de ensino para cursos e tópicos considerando os cinco tipos de resultados esperados por Gagné (1980).

<i>Tipo de resultado esperado</i>	Características de ensino	Pergunta sobre os resultados
Informação verbal	Contexto significativo; esquemas de codificação sugeridos, incluindo tabelas e gráficos.	O estudante será capaz de enunciar a informação desejada?
Habilidade intelectual	Aprendizagem anterior e rememoração de habilidades de pré-requisitos.	O estudante será capaz de demonstrar a aplicação da habilidade?
Estratégia cognitiva	Oportunidades para resolução de um problema novo.	O estudante será capaz de originar novos problemas e suas soluções?
Escolha da ação pessoal	Experiência de sucesso após a escolha de uma ação pessoal ou a observação destes eventos num modelo humano.	O estudante escolherá a pretendida ação pessoal?
Habilidade motora	Experiência da rotina executiva; prática com <i>feedback</i> (conhecimento de resultados) informativo.	O estudante será capaz de executar o desempenho motor?

Fonte: Elaboração própria (2025).

2.6.1.2. Sequência dos pré-requisitos

As sequências lógicas ou temporais relacionadas ao conteúdo do curso planejado devem ser organizadas para atender as necessidades de aprendizagem. Elas se apoiam em conhecimentos prévios de habilidades mais simples para se atingir o objetivo de aprendizagem almejado. Faz-se necessária a apresentação do modelo clássico da relatividade de Galileu no sentido de apoiar o conteúdo da TRE, inédito para os estudantes da Educação Básica.

Além das sequências lógicas, como pré-requisito, é necessária a aprendizagem do significado de palavras ou frases que compõem a informação verbal ou habilidade intelectual. Na apresentação da TRE, além dos postulados, é fundamental que o estudante se aproprie dos elementos matemáticos, como uma transformação de Lorentz, para que se possa justificar os ajustes no andamento do tempo e na medição dos comprimentos entre referenciais inerciais que se movem relativamente.

2.6.2. O planejamento da lição

A sequência didática é construída para ser aplicada numa turma de terceira série do ensino médio regular, composta de aproximadamente vinte e cinco estudantes da educação pública da Secretaria de Educação do Distrito Federal.

Estabelecidos os tópicos e subtópicos dentro de uma sequência apropriada, prossegue-se ao planejamento da aplicação aula a aula. Cada aula proposta tem duração entre quarente e cinco a cinquenta minutos e será considerada como uma lição em que se pretende atingir um ou mais resultados de aprendizagem. As lições devem atender a eventos ordenados que visam influenciar os processos de aprendizagem mencionados na subseção 2.3. Eventos de uma lição:

1. Ativar a motivação: neste momento, procura-se ativar as expectativas dos estudantes que se armazenarão na memória de longa duração. Os motivos podem ser exigências fundamentais, motivos sociais ou motivos pessoais, entre outros.

2. Informar os estudantes sobre o objetivo: neste momento, deve-se induzir no estudante expectativas relacionadas ao resultado de aprendizagem que o curso poderá trazer. Para isso, a motivação poderá ser mantida pelo fato de o estudante considerar o benefício de fazer parte do novo universo da Física contemporânea que até então era por ele desconhecido.

3. Dirigir a atenção: neste momento, deve-se estabelecer estímulos em torno da tarefa de aprendizagem. Inicia-se a aula efetivamente.

4. Estimular a rememoração: nesta etapa, proceder-se-á à busca dos pré-requisitos necessários para o desenvolvimento da lição proposta. Quando a aprendizagem prévia ocorreu há

bastante tempo, faz-se necessária a realização de um evento mais aprofundado para que os estudantes ativem o que foi aprendido antes.

5. Proporcionar orientação à aprendizagem: nesta fase, procura-se garantir a aquisição da aprendizagem pretendida. O estudante orienta-se em relação ao objetivo de aprendizagem ao estender a complexidade da comunicação ou outra forma de aprendizagem.

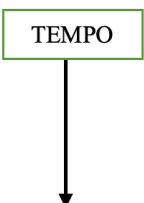
6. Intensificar a retenção: é recomendado que cada lição seja iniciada com revisões das capacidades anteriormente aprendidas. Significa que, em intervalos espaçados pelos encontros, a capacidade aprendida quando rememorada torna-se parte da memória de longa duração.

7. Promover a transferência da aprendizagem: esta etapa busca promover novas aprendizagens utilizando o tema central do curso como pré-requisito – isto é, transferência vertical. Com apoio em uma variedade de exemplos, pode-se também transferir a aprendizagem de um curso para outros campos de estudo – isto é, transferência lateral.

8. Provocar o desempenho seguido de *feedback*: Por fim, a ação em que o estudante deverá demonstrar o desempenho e o professor compartilhará sua performance, com vistas a que se possa revisar os resultados e aperfeiçoar o processo.

A Figura 3 ilustra a relação entre as fases, os processos e os eventos da instrução.

Figura 3. Sequência temporal dos eventos da lição na perspectiva das hierarquias de aprendizagens de Gagné.



Fase	Processo	Eventos da instrução
Motivação	Expectativa	1. Ativar a motivação. 2. Informar o objetivo.
Apreensão	Atenção	3. Dirigir a atenção.
Aquisição	Codificação	4. Estimular a rememoração.
Retenção	Armazenamento na memória	5. Proporcionar orientação à aprendizagem.
Rememoração	Recuperação	6. Intensificar a retenção.
Generalização	Transferência	7. Promover a transferência da aprendizagem.
Desempenho	Resposta	8. Eliciar o desempenho.
<i>Feedback</i>	Reforço	9. Fornecer o <i>feedback</i> .

Fonte: Elaboração própria (2025).

2.7 Entrega da instrução

É chegado o momento de pôr em prática a instrução planejada. Há um leque de opções das maneiras de entrega da instrução e que podem combinar-se para formar padrões de estimulação externa. Cabe ao professor decidir a combinação dos eventos, as formas de entrega do ensino, as

formas de organizar os grupos de estudantes, as sequências das etapas da instrução e os eventos necessários e mais adequados para a aplicação do produto educacional que é objeto da instrução. A instrução em questão seguirá a sequência:

1. Organização da classe: os ensinamentos que deverão ser transmitidos, o número de estudantes e as estratégias adotadas pelo professor na execução das aulas determinarão a disposição em classe. Para um curso em que o foco é a aprendizagem de uma teoria cujas justificativas experimentais são predominantemente empíricas, como é a TRE, deve-se organizar a disposição dos estudantes em classe de modo que possam acessar a lousa, a tela em que serão apresentados slides e vídeos e, ainda, de modo que possam interagir com as falas do professor.

2. Aplicação dos eventos da instrução em sala de aula: na proposta de aplicação de lições, tendo como referencial teórico as hierarquias de aprendizagem de Gagné, para a apresentação do conteúdo, faz-se necessário que o ciclo de rememorações seja frequentemente retomado. O desnível entre os estudantes pode ser um fator que determina mais repetições ou buscas de novas estratégias no sentido de atender os pré-requisitos que permeiam os objetivos das aulas.

3. Eventos iniciais da instrução: as tarefas iniciais percorrem a motivação dos estudantes, a informação acerca dos objetivos da lição e a direção da atenção para os aspectos mais importantes da instrução.

4. Estimulação da rememoração: etapa frequentemente repetida durante a aplicação da instrução. Requer um zelo individual do professor para que não abandone qualquer indivíduo. É importante que os pré-requisitos sejam mencionados frequentemente para que todos acompanhem o conteúdo da aula.

5. Intensificação da retenção: dentre as estratégias de aprendizagem, a que mais se mostra adequada ao trabalho com grupo numeroso de estudantes é a do questionamento contínuo do professor para que respondam acerca do conteúdo em questão, o que fará com que a classe mantenha a atenção. Assim, a partir das respostas dadas, o professor avaliará a necessidade ou não de proceder à recuperação. É adequado que o professor incentive que os estudantes utilizem seus próprios esquemas de recuperação.

6. Revisões espaçadas: ao revisar os conteúdos teoricamente aprendidos, abre-se a oportunidade de acionamento dos processos de recuperação, intensificando-se a retenção. Tais revisões são conduzidas com a classe por meio da aplicação de questionários quanto de testes. Os estudantes enfrentam a necessidade de fazer a recuperação ao confrontar suas próprias respostas com as corrigidas.

7. Tarefas de resolução de problemas: fazer o exercício da generalização, isto é, são aplicadas para que os estudantes possam demonstrar a capacidade de promover a transferência do que foi aprendido para novas situações. É necessário que as tarefas sejam escolhidas pelo professor, para a aplicação, envolvendo habilidades intelectuais e informações disponíveis aos estudantes.

8. Realização de discussões em classe: constitui uma maneira eficiente para promover a transferência da aprendizagem. Quando um grupo de estudantes tem à disposição informações e habilidades em comum, pode expor pensamentos originais e, assim, fornecer *feedback* aos demais membros do grupo. Nesse sentido, reforça-se a originalidade de ideias e o pensamento crítico.

9. Provocação do desempenho e fornecer o *feedback*: momento para o professor arguir os estudantes individualmente. É necessário que sejam incluídos nesse processo todos os estudantes, de modo que o período da aula não seja dominado por aqueles que tiveram mais facilidade e aprenderam mais rápido. O *feedback* apresentado por alguns estudantes não garante necessariamente o benefício dos demais.

O recurso do teste escrito é uma ferramenta importante para vencer a dificuldade de não se incluir a totalidade dos estudantes na verificação de desempenho. Para proporcionar o resultado de imediato logo após a aplicação dos testes, propõe-se que os estudantes troquem as folhas de exame, uns com os outros, e se faça a indicação das respostas corretas e incorretas.

2.8. Sequência didática

O referencial teórico aqui apresentado norteou a sequência didática dessa dissertação. A aplicação é recomendável para estudantes do terceiro ano do Ensino Médio que, cumprindo as etapas da aprendizagem e os eventos da instrução, sejam capazes de discutir e demonstrar desempenho sobre a TRE e a TRG. A sequência será dividida em três etapas de instrução, com o total de 10 aulas: 1. Relatividade clássica; 2. Relatividade Especial; e 3. Relatividade Geral.

A primeira etapa é assunto já trabalhado em séries anteriores e será revisto numa sequência de hierarquias até que os estudantes sejam capazes de fazer generalizações, o que será o principal pré-requisito para as demais etapas.

A segunda etapa tem o enfoque central da pesquisa, pois, além de rediscutir o assunto da primeira etapa, mostrará os ajustes feitos na teoria da relatividade que validarão os princípios da relatividade especial. Nessa etapa, é importante destacar a necessidade de se intensificar a fase da rememoração, pois se trata de questões que extrapolam as visões clássicas e, nesse sentido, não são frequentemente discussões naturais dos estudantes da Educação Básica.

A terceira etapa fará o fechamento para que o estudante tenha a oportunidade de assimilar a influência da gravidade nos contornos do espaço-tempo, caso em que verá um modelo experimental e em que se poderá realizar a etapa das generalizações dentro da sequência didática.

Para a boa condução da sequência didática, é imprescindível conhecimento aprofundado da matéria de ensino. É a isso que se dedica a próxima seção.

3. A FÍSICA EM TORNO DAS TEORIAS DA RELATIVIDADE ESPECIAL E GERAL

3.1. Relatividade clássica

A teoria da relatividade clássica de Galileu Galilei foi uma teoria precursora que surgiu no século XVII e ajudou a estabelecer os fundamentos da Física clássica. Galileu propôs princípios que influenciam a compreensão do movimento dos corpos e a relação entre diferentes referenciais inerciais. Alguns dos princípios fundamentais da sua teoria da relatividade clássica de Galileu (Galileu, 2011) incluem:

- a) Princípio da relatividade: As leis da física são as mesmas para todos os observadores inerciais, ou seja, observadores em movimento uniforme em relação a um sistema inercial.
- b) Invariância das leis da física: As leis da física são invariantes sob transformações de referencial inercial. Isso significa que não importa se um observador está em repouso ou em movimento retilíneo uniforme; as leis da física permanecem as mesmas.
- c) Princípio da inércia: Um corpo em movimento continuará em movimento a menos que uma força externa atue sobre ele. Da mesma forma, um corpo em repouso permanecerá em repouso, a menos que uma força seja aplicada a ele.

Esses princípios estabelecidos por Galileu foram significativos para o desenvolvimento da mecânica clássica e serviram como base para as teorias posteriores, como as leis de Newton e a teoria da relatividade de Einstein.

Embora a teoria da relatividade clássica de Galileu tenha sido superada pela teoria da relatividade especial e geral de Einstein em termos de descrever fenômenos em altas velocidades e na presença de campos gravitacionais intensos, sua importância histórica e influência no desenvolvimento da física são incontestáveis. Além do mais, para os fenômenos cotidianos, de baixas velocidades, a aplicação das transformações de Galileu em suas descrições ainda se mostra eficaz.

3.1.2. Transformação de Galileu

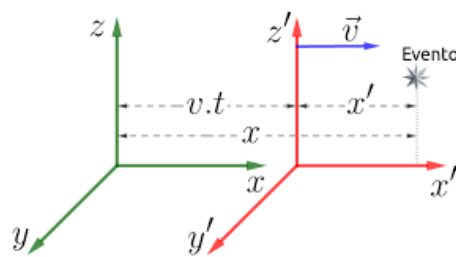
Um evento ocorre no instante t no ponto de coordenadas (x, y, z) , relativas a um referencial de inércia R . Quais são as coordenadas (x', y', z') de A , relativas a um outro referencial de inércia R' , que se move com velocidade V , relativamente a R ?

As transformadas de Galileu são o conjunto de relações matemáticas que conecta estes dois referenciais. Por simplicidade, supomos que o movimento relativo se faz segundo a direção do eixo dos xx' e que os eixos se mantêm sempre paralelos.

No instante $t = 0$, as origens dos referenciais R e R' encontram-se alinhadas e que o tempo passa igualmente para os dois sistemas.

$$t' = t \quad (1)$$

Figura 4. As transformadas de Galileu.



Fonte: Webfisica (2020).

A Figura 4, mostra que:

$$\begin{cases} x' = x - v \cdot t \\ y' = y \\ z = z' \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x = x' + v \cdot t \\ y = y' \\ z = z' \end{cases} \quad (3)$$

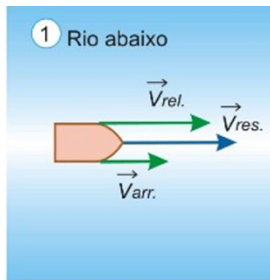
o que, além de traduzir o carácter absoluto do tempo, não impõe limite para a velocidade do evento (Teorema de adição de velocidades) (Einstein, 1999).

Um exemplo clássico para ilustrar o movimento relativo de Galileu é o da composição de movimentos de um barco a motor e da correnteza de um rio:

Para dois observadores, 1 e 2, posicionados nas margens do rio, o primeiro fixo em relação a terra e o segundo caminhando paralelamente às margens na mesma velocidade da correnteza, terão percepções distintas para o movimento do barco.

As figuras a seguir ilustram o movimento composto de um barco que se desloca em relação às águas de um rio e da correnteza que se desloca paralelamente às margens.

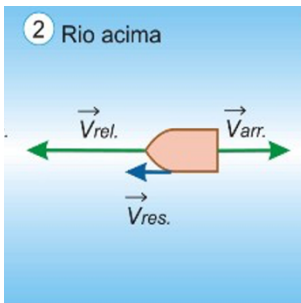
Figura 5. Barco a favor da correnteza.



$$\vec{v}_{res} = \vec{v}_{rel} + \vec{v}_{ar} \quad (4)$$

Fonte: Ramalho 2010.

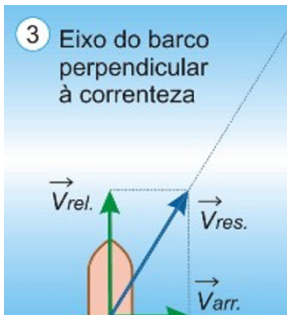
Figura 6. Barco contra da correnteza.



$$\vec{v}_{res} = \vec{v}_{rel} - \vec{v}_{ar} \quad (5)$$

Fonte: Ramalho 2010.

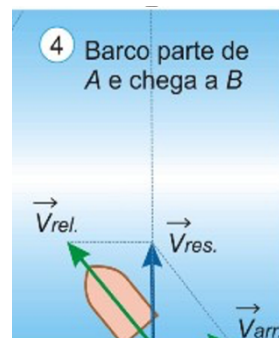
Figura 7. Barco perpendicular à correnteza.



$$\left(\vec{v}_{res}\right)^2 = \left(\vec{v}_{rel}\right)^2 + \left(\vec{v}_{ar}\right)^2 \quad (6)$$

Fonte: Ramalho 2010.

Figura 8. Barco diagonalmente à correnteza.



$$\left(\vec{v}_{rel}\right)^2 = \left(\vec{v}_{res}\right)^2 + \left(\vec{v}_{ar}\right)^2 \quad (7)$$

Fonte: Ramalho 2010.

Em todas as situações anteriores, para o observador 1 (fixo em relação à terra) a velocidade do barco será $\vec{v}_{res}$ e para o observador 2 (em movimento com a correnteza) será $\vec{v}_{rel}$.

3.2. Difração da Luz e o Experimento de Michelson-Morley: Uma Análise do Éter Luminífero

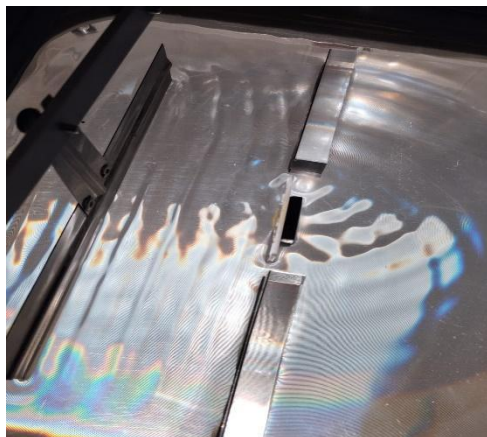
3.2.1. Difração da Luz

A difração é um fenômeno ondulatório que ocorre quando uma onda encontra um obstáculo ou fenda cuja dimensão é comparável ao seu comprimento de onda. No caso da luz, a difração se manifesta como o desvio e a curvatura das frentes de onda ao redor de objetos ou através de aberturas, resultando na formação de padrões de interferência.

Embora a luz se comporte como partícula em muitos contextos, ela também apresenta comportamento ondulatório. Quando a luz passa por uma fenda estreita ou por entre dois obstáculos próximos, as diferentes partes da frente de onda se espalham e podem interferir entre si, gerando padrões claros e escuros, os chamados padrões de interferência. A presença desses padrões é uma evidência direta da natureza ondulatória da luz.

De acordo com o princípio de Huygens-Fresnel, cada ponto de uma abertura ilumina-se como uma fonte secundária de onda, cujas somas interferem e produzem padrões de difração observáveis. O mesmo fenômeno pode ser observado em ondas mecânicas transversais produzidas na superfície da água numa cuba de ondas (Figura 9). Nota-se que ao passar pela fenda a onda propaga contornando os obstáculos.

Figura 9: Difração de ondas



Fonte: Elaboração Própria

Realizando a difração em duas fendas simultaneamente, cada fenda produzirá ondas circulares que irão se sobrepor criando um padrão de interferências construtivas e destrutivas, como se vê na

figura 10.

Figura 10: Padrão de interferências



Fonte: Elaboração Própria

Espera-se a formação de padrões de interferência construtiva ou destrutiva entre ondas luminosas provenientes de duas fontes distintas. O padrão é alterado pelas diferenças de percurso das ondas de cada fonte que é o ponto crucial para investigar a existência do “Éter Luminífero”.

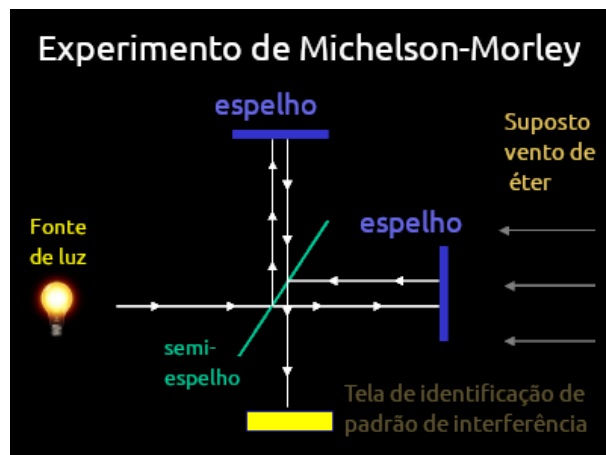
3.2.2. *O Experimento de Michelson-Morley*

Apesar da crescente aceitação da natureza ondulatória da luz, havia um problema teórico: todas as ondas conhecidas precisavam de um meio para se propagar (por exemplo, o som se propaga no ar). Assim, supôs-se que deveria existir um meio invisível e imponderável preenchendo todo o espaço: o éter luminífero. Esse éter seria o meio necessário para que as ondas eletromagnéticas, como a luz.

O éter, no entanto, nunca foi diretamente detectado. Era uma entidade hipotética, com propriedades difíceis de conciliar: deveria ser rígido o suficiente para transmitir luz e, ao mesmo tempo, não interagir com a matéria.

Em 1887, Albert Michelson e Edward Morley desenvolveram um experimento extremamente sensível para detectar o "vento de éter", ou seja, o movimento relativo da Terra em relação ao éter. Utilizaram um interferômetro (Figura 11), aparelho capaz de medir minúsculas diferenças no tempo que a luz leva para percorrer diferentes trajetórias perpendiculares.

Figura 11: Interferômetro



Fonte: ESHAM

A lógica era simples: se a Terra se movesse através do éter, a velocidade da luz deveria variar dependendo da direção, o que causaria uma mudança no padrão de interferência observado. No entanto, o resultado foi surpreendente: nenhuma diferença foi detectada. A luz se comportava da mesma forma em todas as direções, contrariando as previsões baseadas na existência do éter.

O resultado implodiu a hipótese do éter estacionário, pois indicava que a velocidade da luz era a mesma em todas as direções e para todos os observadores, independentemente de seu movimento. Isso contradizia as expectativas baseadas na mecânica clássica e no éter.

Em 1905, Einstein postula que a velocidade da luz é constante em todos os referenciais inerciais, eliminando a necessidade do éter associado como meio de propagação. O Experimento de Michelson-Morley tornou-se uma das pedras angulares que sustentam a formulação da relatividade restrita.

3.3 Relatividade restrita e geral

3.3.1. Teoria da Relatividade Restrita

A teoria da relatividade restrita, proposta por Albert Einstein em 1905, revolucionou nossa compreensão do espaço, tempo e movimento. Esta teoria fundamenta-se em dois princípios fundamentais:

1. **Princípio da relatividade:** As leis da física são as mesmas para todos os observadores inerciais. Isso significa que não importa o quão rápido alguém esteja se movendo, as leis da física são consistentes e previsíveis para todos.

2. **Constância da velocidade da luz:**

A velocidade da luz no vácuo é a mesma para todos os observadores, independentemente da velocidade relativa da fonte de luz. Isso significa que a velocidade da luz é uma constante universal de aproximadamente 299,792 km/s.

A teoria da relatividade restrita trouxe consequências surpreendentes e contraintuitivas, como a dilatação do tempo e a contração do comprimento em altas velocidades. Por exemplo, de acordo com a relatividade restrita, um observador em movimento perceberá o tempo passando mais devagar em relação a um observador em repouso, fenômeno conhecido como dilatação do tempo.

Além disso, a relatividade restrita revelou a famosa equação $E = m \cdot c^2$, que descreve a equivalência entre energia (E) e massa (m) em termos da velocidade da luz (c). Essa equação mostrou que a energia contida na massa é enorme e abriu caminho para o desenvolvimento da física nuclear e a compreensão das reações nucleares.

A teoria da relatividade restrita é essencial para a física moderna e tem se mostrado precisa em inúmeras aplicações, desde a construção de satélites até a explicação de fenômenos astrofísicos. Sua aceitação generalizada transformou nossa visão do universo e inspirou avanços significativos na ciência e na tecnologia. Em suma, a teoria da relatividade restrita de Einstein representa um dos marcos mais importantes na história da física e da humanidade.

Tendo em vista o segundo princípio da teoria da relatividade restrita. Na qual a velocidade da luz no vácuo é a mesma para todos os observadores, contraria a ideia de Galileu de que o tempo tem caráter absoluto sendo necessário ajustes matemáticos para diferenciar o andamento dos relógios e as medidas de comprimentos entre referencias que se movem relativamente.

A seguir é apresentada a correção dada pelo fator de Lorentz.

3.3.2. *Transformações de Lorentz*

Tão logo que surgiu as equações de Maxwell, os cientistas perceberam que a aplicação das transformadas de Galileu para descrever o comportamento de ondas eletromagnéticas em outros referenciais apresentava graves problemas do ponto de vista físico.

Na intenção de romper com as contradições da física de seu tempo, um cientista holandês, Hendrik Lorentz, ajustou as transformadas de Galileu sugerindo haver um fator de correção γ capaz de corrigi-las.

Vamos considerar uma consequência fundamental dos postulados de Einstein: a relação geral entre as coordenadas espaço-temporais x , y , z e t de um evento, conforme observado no referencial S , e as coordenadas x' , y' , z' e t' do mesmo evento, conforme visto no referencial S' , que se move com velocidade uniforme em relação a S . Para simplificar, consideraremos apenas o caso específico em que as origens dos dois sistemas de coordenadas coincidem no tempo $t = t' = 0$ e S' se move, em relação a S , com velocidade “ v ” ao longo do eixo x (ou x'), com os eixos y' e z' paralelos, respectivamente, aos eixos y e z , conforme já ilustrado na Fig. 4 e nas respectivas equações:

$$\begin{cases} x' = x - v \cdot t \\ y' = y \\ z = z' \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x = x' + v \cdot t \\ y = y' \\ z = z' \end{cases} \quad (9)$$

Utilizando o fator γ para o tempo nos diferentes referenciais teremos:

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - v \cdot t) \\ y' = y \\ z = z' \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} x = \gamma(x' + v \cdot t) \\ y = y' \\ z = z' \end{cases} \quad (11)$$

Substituindo x' (referencial S') na equação de x (referencial S), teremos:

$$x = \gamma(\gamma(x - v \cdot t) + v \cdot t) \quad (12)$$

$$t' = \gamma \cdot t + \left(\frac{1 - \gamma^2}{\gamma \cdot v} \right) \cdot x \quad (13)$$

Note que t e t' , segundo a correção proposta, agora já não mais se equivalem, e que dependem do espaço.

Para encontrarmos o valor do fator de correção, admitiremos como premissa que a velocidade da luz é constante igual a c . Ou seja, a velocidade da luz é a mesma para os dois referenciais.

Suponhamos que um feixe de luz foi disparado em um dos referenciais, em $t = 0$, então:

$$S: x = c \cdot t \quad (14)$$

$$S': x' = c \cdot t' \quad (15)$$

$$\rightarrow \gamma \cdot (x - v \cdot t) = c \cdot \left(\gamma \cdot t + \left(\frac{1 - \gamma^2}{\gamma \cdot v} \right) \cdot x \right) \quad (16)$$

$$x = c \cdot t \cdot \left[\frac{\gamma + \gamma \frac{v}{c}}{\gamma - c \cdot \left(\frac{1 - \gamma^2}{\gamma \cdot c} \right)} \right] \quad (17)$$

Observe que o termo entre colchetes deve valer 1:

$$\left[\frac{\gamma + \gamma \frac{v}{c}}{\gamma - c \cdot \left(\frac{1 - \gamma^2}{\gamma \cdot c} \right)} \right] = 1 \quad (18)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (19)$$

Em posse agora do valor de correção, temos as transformadas de Lorentz:

TRANSFORMAÇÃO de S em S'

$$x' = \frac{x - v \cdot t}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \gamma(x - v \cdot t) \\ y = y' \end{array} \right. \quad (21)$$

$$z = z'$$

$$t' = \frac{t - \frac{v \cdot x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (22)$$

$$t' = \gamma \cdot (t - \frac{v \cdot x}{c^2}) \quad (23)$$

TRANSFORMAÇÃO de S' em S

$$x = \frac{x' + v \cdot t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (24)$$

$$\begin{cases} x = \gamma(x' + v \cdot t') \\ y = y' \\ z = z' \end{cases} \quad (25)$$

$$t = \frac{t' + \frac{v \cdot x'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (26)$$

$$t = \gamma \cdot (t' + \frac{v \cdot x'}{c^2}) \quad (27)$$

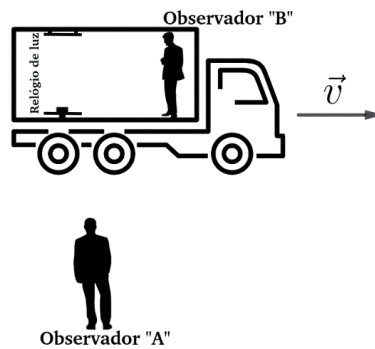
3.3.2.1. Dilatação dos Tempos

Considere a seguinte situação: No interior de um caminhão existe um relógio de luz, o seu funcionamento consiste em disparar do chão do veículo um pulso de luz que, ao ser disparado em direção ao teto, encontra lá um espelho que o reflete, fazendo-o retornar ao ponto de disparo onde

ele é capturado novamente. O tempo marcado por este relógio corresponde ao tempo necessário para que este processo seja executado.

Dentro do veículo temos um observador, que chamaremos de B. Junto a superfície terrestre, observando o automóvel que se move, temos o observador A.

Figura 12(a). Relatividade Especial (dilatação dos tempos).



Fonte: Webfísica (2020).

O tempo decorrido para o evento segundo o observador "B" é calculado pela equação 8 da figura 12(b):

Figura 12(b). Relatividade Especial (dilatação dos tempos).

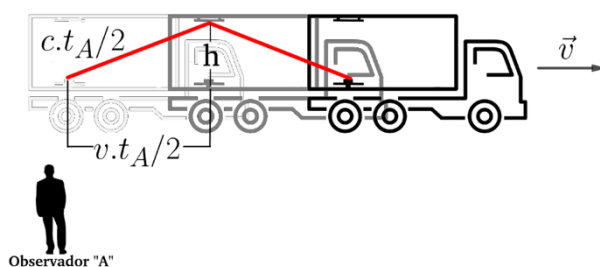


$$t_B = \frac{2h}{c} \quad (28)$$

Fonte: Webfísica (2020).

O tempo decorrido para o evento segundo o observador "A" (figura 12(c)):

Figura 12(c). Relatividade Especial (dilatação dos tempos).



Fonte: Webfísica (2020).

Analisando o triângulo retângulo e aplicando Pitágoras, obteremos:

$$\left(\frac{c \cdot t_A}{2}\right)^2 = \left(\frac{v \cdot t_A}{2}\right)^2 + h^2 \quad (29)$$

Isolando t_A na expressão anterior, teremos:

$$t_A = \frac{2 \cdot h}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (30)$$

Substituindo (8) em (10), teremos:

$$t_A = t_B \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (31)$$

em que o fator $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ é conhecido como fator de Lorentz. Portanto, teremos:

$$t_A = t_B \cdot \gamma \quad (32)$$

Como $\gamma > 1$, então, $t_A > t_B$.

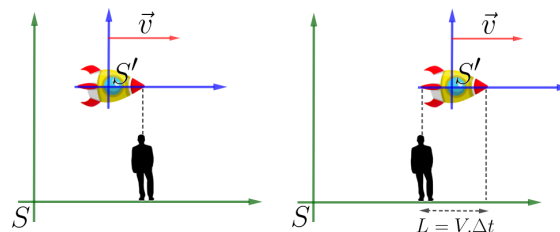
Percebe-se que o andamento dos relógios para cada observador é diferente pois o resultado do tempo “ t_A ” é o tempo “ t_B ” multiplicado pelo fator de Lorentz (γ) que sempre será superior a 1 (Einstein, 1999, p. 37). Logo, o tempo medido no relógio marcando os eventos na percepção do observador em movimento junto ao caminhão é menor que o tempo medido pelo observador em repouso fora do caminhão.

3.1.1.2. Contração dos Comprimentos

Medir comprimentos pressupõe que realizemos duas medidas simultaneamente. No entanto, as transformadas de Lorentz dizem que um evento simultâneo em um referencial pode não ser simultâneo em outro. Para contornar tal situação, mediremos, em cada referencial, o tempo que o objeto medido demora para passar diante de um determinado ponto. Sabendo-se este tempo e a velocidade entre os referenciais, teremos a medida desejada.

Consideremos o exemplo a seguir. O objetivo é calcular o comprimento da nave espacial.

Figura 13. Contração dos comprimentos.



Fonte: Webfísica (2020).

Perceba que o comprimento L marcado em S é dado por:

$$L = v \cdot \Delta t. \quad (33)$$

E, por analogia, podemos medir o comprimento L' em relação a S por:

$$L' = v \cdot \Delta t' \quad (34)$$

Sabemos que o tempo próprio (Δt) é medido em S .

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\gamma} \quad (35)$$

Substituindo as equações (13) e (14) em (15), chegaremos na fórmula da contração de Lorentz:

$$L = \frac{L'}{\gamma} \quad (36)$$

Pela mesma lógica da dilatação dos tempos, porém com a operação inversa já que o comprimento medido no interior da nave (L') é dividido pelo fator de Lorentz (γ), que é sempre maior que 1, os comprimentos medidos por observadores em repouso, fora da nave, serão menores que os medidos por aqueles no interior da nave.

3.3.1.3. Relação Massa e Energia

A teoria da relatividade restrita de Einstein introduziu a famosa equação $E = m \cdot c^2$, que descreve a equivalência entre massa e energia. Vamos explorar como essa equação fundamental funciona:

E : a energia total de um sistema.

m_0 : a massa do objeto em repouso.

c : velocidade da luz no vácuo ($\sim 299,792$ km/s) – uma constante fundamental.

$E = m_0 \cdot c^2$: a energia de repouso do objeto.

Isso significa que a massa de um objeto possui uma quantidade enorme de energia potencial nela contida, conforme descrito pela famosa equação.

Essa equação implica que uma pequena quantidade de massa pode ser convertida em uma grande quantidade de energia, conforme demonstrado em reações nucleares e no funcionamento de reatores nucleares. Por exemplo, durante a fusão nuclear no sol, pequenas quantidades de massa são convertidas em enormes quantidades de energia, alimentando a estrela.

Essa descoberta revolucionária teve grandes implicações para a Física, levando ao desenvolvimento de tecnologias como a energia nuclear e a exploração do cosmos.

3.3.1.4. Expansão da Massa Relativística

A massa de um corpo varia de acordo com a velocidade que se desloca e tende ao infinito quando o corpo se aproxima da velocidade da luz. Este resultado tem descrição similar à dilatação do tempo e é dado por:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (37)$$

A equação (17) limita a velocidade dos corpos à velocidade da luz no vácuo já que sua massa inercial se elevaria a níveis muito altos ao aproximar-se da velocidade da luz no vácuo. O segundo princípio da relatividade restrita tem na massa relativística um forte fundamento de validade.

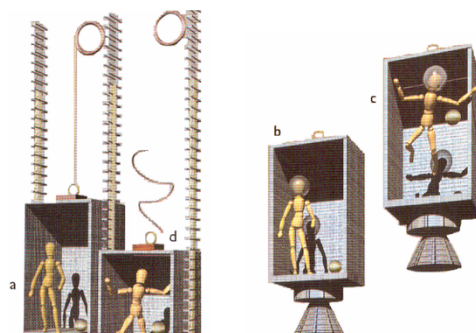
3.3.2. Teoria da Relatividade Geral

A Teoria da Relatividade Geral (TRG), proposta por Albert Einstein em 1915, revolucionou nossa compreensão da gravidade ao descrevê-la não como uma força, mas como a curvatura do espaço-tempo causada pela presença de matéria e energia. Enquanto a física newtoniana tratava a gravidade como uma ação à distância, Einstein mostrou que objetos massivos, como estrelas e planetas, deformam a estrutura do espaço-tempo, e essa deformação guia o movimento de corpos e até a trajetória da luz.

O princípio da equivalência de Einstein afirma a massa inercial de um corpo equivale a sua massa gravitacional (Einstein, 1999, p. 59), isto é, um indivíduo não fará distinção se está parado na superfície da terra ou num foguete viajando pelo espaço com aceleração de 1g (9,81 m/s²). Da mesma maneira, também não haveria diferença entre uma pessoa em queda livre ou em gravidade zero. Uma pessoa em queda livre se sentiria sem peso algum, como se a gravidade deixasse de existir.

Essas ideias simples, chamadas de princípio da equivalência, foram a base para Einstein perceber que a queda livre também era um movimento inercial e, portanto, as leis da relatividade também deveriam se aplicar.

Figura 14. Princípio da equivalência (elevador x foguete).



Fonte: O Universo numa casca de noz (2016, p. 24).

Einstein percebeu que a gravidade tem a propriedade, e é a única força que pode ser localmente indistinguível de uma ausência de força, desde que se adote o referencial de um observador em queda livre, no qual os efeitos gravitacionais não se manifestam como força resultante.

Pensando dessa forma, um sistema de referência não-inercial (acelerado) é exatamente igual à força gravitacional em um sistema inercial (em repouso), logo, a gravidade também deveria se aplicar de algum modo dentro da relatividade. Mas, a gravidade da terra é sempre concêntrica, não há como ter uma “aceleração para cima” em todos os lados do planeta, portanto, a única resposta seria que a própria geometria do espaço-tempo seria curva.

Einstein publicou em 1913 que a razão para o espaço-tempo se curvar é a combinação de energia e momento, levando-o a intensos estudos sobre espaços e superfícies curvas nos trabalhos desenvolvidos pelo matemático George F. Riemann, chamado de geometria riemanniana (Einstein, 1913). Apesar de, inicialmente, Einstein não ter encontrado as equações que relacionassem massa, energia e momento com a curvatura do espaço, com a ajuda de amigos matemáticos essas equações foram finalmente desenvolvidas e publicadas em novembro de 1915. (Einstein, 1915)

A equação de campo de Einstein é o coração da Teoria da Relatividade Geral e descreve como a matéria e a energia curvam o espaço-tempo exemplificado na figura 12. Sua forma compacta é:

$$G_{\mu\nu} + \Lambda \cdot g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} \cdot T_{\mu\nu} \quad (38)$$

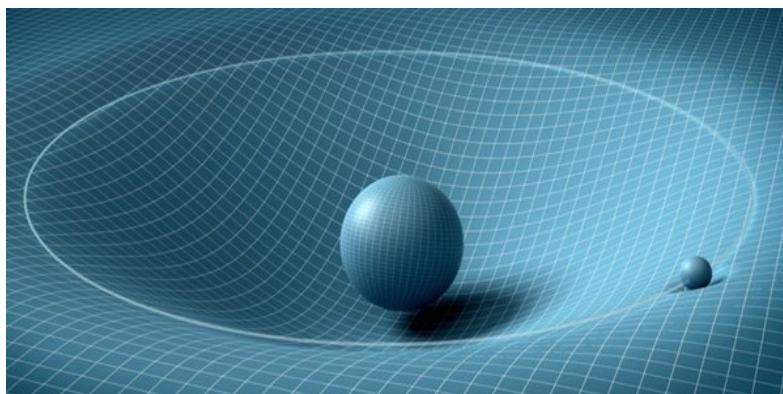
Significado dos Termos:

1. $G_{\mu\nu}$ (*Tensor de Einstein*):
 - o Representa a curvatura do espaço-tempo.
 - o Combina o tensor de Ricci ($R_{\mu\nu}$) e o escalar de curvatura (R):
2. $g_{\mu\nu}$ (*Tensor métrico*):
 - o Define a geometria do espaço-tempo, determinando distâncias e intervalos.
3. Λ (*Constante cosmológica*):
 - o Introduzida por Einstein para um universo estático (hoje associada à energia escura).

4. $T_{\mu\nu}$ (*Tensor energia-momento*):
 - o Descreve a distribuição de matéria e energia no espaçotempo.
5. G (*Constante de proporcionalidade*):
 - o G : Constante gravitacional de Newton.
 - o c : Velocidade da luz no vácuo.
 - o Garante que a equação se reduza à gravidade newtoniana em limites clássicos.

Os dois membros da equação de campo associam a curvatura do espaçotempo ao conteúdo de matéria e energia.

Figura 15. Deformação do espaçotempo.



Fonte: Universo Racionalista (2017).

3.3.2.1. Gravidade Newtoniana e Relatividade Geral

A compreensão da gravidade evoluiu radicalmente desde a lei da gravitação universal de Newton (1687) até a Teoria da Relatividade Geral de Einstein (1915). Enquanto a gravidade clássica descreve a atração entre massas de forma instantânea e sem considerar a estrutura do espaço-tempo, a Relatividade Geral redefine a gravidade como uma curvatura do espaçotempo causada por matéria e energia.

Na teoria da Gravidade Clássica a força gravitacional tem ação instantânea, sem um meio físico ou atraso temporal. Isso viola o princípio da TRE que estabelece a velocidade limite da luz. Além disso, o espaço e o tempo são tratados como entidades distintas e absolutas para todos os observadores.

Na TRG Massa e energia deformam o tecido quadridimensional (3D espaciais + tempo). Corpos em queda livre seguem geodésicas (caminhos mais curtos nesse espaço curvo). Relógios próximos a massas grandes (como a Terra) são mais lentos. A luz se curva ao passar por um campo gravitacional.

Quadro 3. Comparação entre Gravidade Newtoniana e Relatividade Geral.

Aspecto	Gravidade Newtoniana	Relatividade Geral
Natureza da Gravidade	Força instantânea à distância.	Curvatura do espaço-tempo dinâmico.
Espaço e Tempo	Absolutos e independentes.	Interligados em um contínuo quadridimensional.
Velocidade da Gravidade	Infinita (ação instantânea).	Propagação na velocidade da luz (c).
Efeitos Extremos	Falha em campos gravitacionais intensos.	Explica buracos negros, Big Bang, expansão cósmica.
Equações	$F_G = \frac{G \cdot M \cdot m}{r^2}$	$G_{\mu\nu} + \Lambda \cdot g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} \cdot T_{\mu\nu}$

Fonte: Elaboração Própria.

3.3.2.2. Comprovação da Teoria da Relatividade Geral

Em meados de 1914, Einstein iniciou algumas de várias expedições pelo mundo a procura de eclipses do sol. Se Einstein estivesse realmente certo e a curvatura do espaço fosse verdadeira, a gravidade do Sol iria desviar ligeiramente o caminho da luz das estrelas próximas. Com a Lua cobrindo a intensa luz do Sol, as estrelas ficariam visíveis para serem fotografadas.

Durante suas pesquisas, se desenvolvia a 1ª Guerra mundial, o que se constituiu em um entrave para a realização do experimento. Neste período, enviou equipes para a Argentina e EUA, porém, o tempo nublado prejudicou a observação do eclipse solar nesses locais e, portanto, foram incapazes de concluir a pesquisa.

Esse foi um acaso de muita sorte para Einstein, pois, nesse ano de 1914, suas equações de campo ainda estavam incompletas e, consequentemente, incorretas. Se o eclipse solar tivesse sido observado, os resultados experimentais obtidos seriam discrepantes com as previsões teóricas, o que invalidaria a teoria da relatividade e prejudicaria a credibilidade de Einstein. Em 1915, Einstein corrigiu todas as suas equações antes da publicação final de seu trabalho.

Em 1919 a teoria da relatividade foi colocada novamente à prova. Foi realizada uma nova expedição com o astrônomo britânico Arthur Eddington para onde aconteceria um novo eclipse solar total. Novamente, o céu claro e a Lua cobrindo completamente o disco solar permitiria que as estrelas da constelação de Touro fossem fotografadas e analisadas. Parte da expedição rumou para a ilha de Príncipe, na costa da África, e outra para a cidade de Sobral, aqui no Brasil, para fotografar o eclipse solar, comparar a posição das estrelas e verificar se os desvios eram compatíveis com a

relatividade geral. O resultado foi que sim, eles eram. As posições das estrelas estavam ligeiramente deslocadas devido à gravidade do Sol, exatamente nas mesmas medidas de ângulo previstas pelas equações da relatividade geral de Einstein.

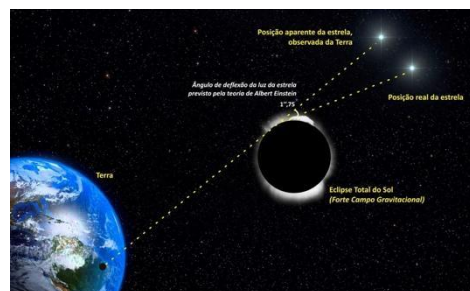
O sucesso das previsões e das observações do eclipse de 1919, validando a relatividade geral, estamparam a capa dos jornais na época, tornando Einstein e sua teoria mundialmente famosos. Apesar do ceticismo com relação aos erros instrumentais dos equipamentos rudimentares e de suspeitas de viés de confirmação, Einstein passou por mais um experimento bem-sucedido em 1923, quando o astrônomo William Campbell divulgou resultados prévios das medidas com alto rigor científico de mais de 3.000 estrelas. Todos os resultados validaram novamente a teoria da relatividade geral.

Figura 16. Foto do eclipse solar total de 1919 em Sobral/CE, registrado pela expedição de Arthur Eddington.



Fonte: Observatório Nacional (1919).

Figura 17. Representação da trajetória da luz de uma estrela durante o eclipse solar.



Fonte: ComCiência (2019).

3.3.2.3. Buracos negros e Horizonte de eventos

Buracos negros são regiões do espaçotempo em que a gravidade é tão intensa que nada, nem mesmo a luz, consegue escapar. Eles se formam quando estrelas massivas colapsam sob sua própria gravidade após uma explosão de supernova. Suas principais características incluem:

- Horizonte de eventos: O "ponto sem retorno", além do qual a fuga é impossível.

- Singularidade: Um ponto de densidade infinita no centro, onde as leis da física conhecidas deixam de valer.
- Efeitos extremos: Distorcem o espaçotempo, dilatam o tempo e emitem radiação (Hawking).

A primeira imagem (Figura 15) de um buraco negro (M87*, em 2019) foi possível graças a técnicas que envolvem lentes gravitacionais.

Figura 18. Horizonte de eventos.



Fonte: EHT (2019).

O horizonte de eventos é a fronteira teórica ao redor de um além da qual nenhuma forma de matéria ou radiação (incluindo a luz) pode escapar. Ele marca o ponto de não retorno, onde a atração gravitacional é tão intensa que a velocidade de escape excede a velocidade da luz (c). A figura 15 tem na sua região central (escura) um buraco negro. A luz em volta tem na sua circunferência interna o limite do horizonte de eventos. Essa luz é proveniente de fontes (estrelas) atrás do buraco negro, que teve sua trajetória seguida de acordo com a curvatura do espaçotempo provocada pelo buraco negro.

Para um buraco negro não rotativo, o horizonte de eventos é definido pelo Raio de Schwarzschild:

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} \quad (39)$$

Um buraco negro com a massa do Sol teria $R_s \approx 3$ km.

3.3.2.4. Lentes Gravitacionais

As lentes gravitacionais são um dos fenômenos mais fascinantes previstos pela TRG. Elas ocorrem quando a luz de um objeto distante (como uma galáxia ou quasar) é curvada pela gravidade de um corpo massivo (como um aglomerado de galáxias) situado entre a fonte luminosa e o observador. Esse efeito não apenas confirma a curvatura do espaço-tempo, mas também se tornou uma ferramenta poderosa para estudar matéria escura, energia escura e a estrutura do universo em larga escala.

De acordo com a Relatividade Geral, a presença de massa deforma o espaço-tempo, fazendo com que a luz siga trajetórias curvas ao passar por regiões de forte campo gravitacional. O ângulo de deflexão α para um raio de luz que passa a uma distância b de uma massa M é dado por:

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 b} \quad (40)$$

4. PRODUTO EDUCACIONAL

O produto educacional a seguir apresentado se refere ao ensino de Física Moderna e Contemporânea, especificamente sobre a Teoria da Relatividade Restrita e Geral, numa sequência didática de referencial teórico fundado em Hierarquias de Aprendizagem de Robert Gagné para estudantes do terceiro ano do Ensino Médio.

O trabalho apresenta a aplicação e análise de uma sequência didática com aulas presenciais na qual o professor se utiliza de projeções em Powerpoint, exposição no quadro negro, discussões em grupos, realização de experimentos, debates, simulações com vídeos de experimentos empíricos, avaliações individuais e em grupos, entre outras ferramentas com a finalidade de trazer aos estudantes capacidade de generalização sobre o tema abordado com bom desempenho das teorias estudadas.

A sequência foi aplicada em 5 encontros com 2 aulas de 45 minutos cada, totalizando 10 aulas. Está dividida em três módulos centrais: 1. Relatividade Clássica de Galileu; 2. Teoria da Relatividade Restrita; e 3. Teoria da Relatividade Geral.

O resumo da sequência didática é estruturado nos quadros a seguir:

Quadro 4. Estrutura do produto educacional

MÓDULOS	AULAS	CONTEÚDOS	DINÂMICA
1. Relatividade Clássica de Galileu	1 e 2	Movimento Relativo Clássico e transformadas de Galileu	Aula expositiva, projeção de slides, projeção de vídeos, discussões em grupos e questionários.
2. Teoria da Relatividade Restrita	3 e 4	Princípios da relatividade especial e Transformadas de Lorentz <u>Dilatação dos tempos e paradoxos</u>	Aula expositiva, projeção de slides, projeção de vídeos, discussões em grupos e questionários.
	5 e 6	Contração dos comprimentos e <u>Relação massa – energia</u>	
3. Teoria da Relatividade Geral	7 e 8	Princípio da Equivalência e Geometria do espaço-tempo	Aula expositiva, projeção de slides, projeção de vídeos, aula experimental, discussões em grupos e questionários.
	9 e 10	Comprovação da Relatividade Geral e Aplicações da Teoria da Relatividade	

Fonte: Elaboração própria (2025).

A organização e planejamento das aulas leva em consideração que conteúdos mais inclusivos serão desdobrados em tópicos logicamente subordinados, levando-se em consideração uma estrutura temporal que descreva a progressão natural dos eventos envolvidos.

Quadro 5. Sequência estrutural do planejamento das aulas.

Etapas	Descrição
Identificação	Descreve os elementos, agentes, conteúdos e aulas de cada módulo.
Objetivo Geral	Meta final de cada módulo.
Objetivos Específicos	Identificação dos conteúdos abordados em cada módulo.
Metodologia	Mostra a estrutura geral das aulas com base no referencial teórico dessa sequência didática bem como as estratégias empregadas em cada aula.
Recursos Necessários	Traz o rol de todos os recursos empregados em cada aula.
Referencial Teórico	Descreve a associação das aulas aplicadas e a teoria didática que referencia a presente aplicação.
Avaliação	Modulação da aprendizagem ao final de cada aplicação.

Fonte: Elaboração própria (2025).

4.1. Planos de aula dos módulos

4.1.1. Módulo 1. Relatividade Clássica de Galileu (aulas 1 e 2)

1. Identificação

Nível de ensino	Médio
Docente responsável	Giovanni Sesostres Ferreira Ribeiro
Área do conhecimento	Física
Tema do Módulo	Relatividade Clássica
Título (Tópico) da aula	Movimentos relativos e Composição de movimentos
Tipo predominante	Teórica
Duração prevista	2 aulas de 45 minutos cada (1h30)

2. Objetivo principal

Discutir tópicos de relatividade clássica, visando compreender os movimentos relativos, as composições de movimento e a ideia de referencial na perspectiva de Galileu.

3. Objetivos Específicos

- Apresentar o princípio da independência dos movimentos simultâneos de Galileu e as bases teóricas dos movimentos compostos.
- Entender a ideia de referencial para definir o movimento e o repouso de um corpo.
- Utilizar uma transformada de Galileu para movimentos relativos.
- Apresentar dados iniciais que justificam a falha do modelo clássico para os movimentos em “altas velocidades”.

4. Metodologia

Esse e os demais módulos foram estruturados na teoria das hierarquias da aprendizagem de Robert Gagné, mesclando ideias do behaviorismo e do cognitivismo.

O presente módulo foi executado em apenas um encontro com uma aula dupla, na qual foram utilizadas as estratégias descritas a seguir.

Estratégias didáticas (aulas 1 e 2):

a) Apresentar inicialmente aos estudantes os conteúdos que compõem o presente produto educacional.

b) Apontar as principais diferenças dos modelos da relatividade clássica e da física contemporânea por meio dos experimentos empíricos propostos por Einstein. A corrida do espelho com a velocidade da luz faria com que a imagem desaparecesse. A lâmpada do vagão do trem que viaja a velocidade da luz deixaria de iluminar parte dele.

c) Explicar o movimento compostos com a apresentação dos vídeos: “Escada rolante”, “Esteira rolante do aeroporto” e “O barco e a correnteza”.

d) Apresentar o princípio da independência dos movimentos simultâneos de Galileu sob o ponto de vista da relatividade clássica que considera o tempo como grandeza absoluta.

e) Utilizar o exemplo do barco na correnteza, visto no vídeo para determinar que a velocidade resultante vem da composição vetorial do seu movimento próprio e o da correnteza.

f) Explicar a ideia de referencial, definir o referencial inercial a partir dos elementos observados nos vídeos.

g) Formar grupos de 3 a 5 estudantes e mediar discussão proposta por meio do questionário do apêndice 1 A.

h) Apresentar os referenciais no modelo cartesiano do movimento relativo, explicar os parâmetros de espaço, tempo e velocidades numa transformada de Galileu.

i) Abrir novo momento de discussão retomando os assuntos discutidos durante a aula e avaliar a necessidade de retomada dos assuntos vistos.

j) Aplicar um instrumento com questões para que os estudantes possam ser avaliados individualmente sobre o tema: Relatividade Clássica.

5. Recursos utilizados

Para aplicação dessa sequência, foram utilizados os seguintes recursos: quadro branco, pincel, projetor de vídeo, caixa de som, computador, internet, questionários impressos.

6. Referencial teórico

A aplicação do Módulo 1 – Relatividade clássica de Galileu, teve sustentação teórica nas Hierarquias de aprendizagem de Robert Gagné cujas etapas de aprendizagem devem ser seguidas e constantemente revisadas.

Na etapa da motivação a estratégia Behaviorista foi tanto utilizar a motivação por recompensa, já que as avaliações extraídas da aplicação compuseram parte da nota do quarto bimestre. Quanto a motivação por expectativa foi atingida com o próprio conteúdo, pois os estudantes tiveram o primeiro contato com a Física moderna e contemporânea. Todos eles ficaram muito curiosos em poder saber sobre esse tema.

Nas etapas de apreensão e aquisição, o foco foi a apresentação dos conceitos de referencial, repouso, movimento no referencial clássico onde o tempo tem caráter absoluto. Nessa fase, foram apresentados os vídeos e os conceitos no quadro branco.

Nas etapas de retenção e rememoração os estudantes formaram grupos de discussão mediados pelo professor. Após as falas dos estudantes sobre os conteúdos da aula, o professor intervém nas respostas dando feedback positivo para as falas corretas e fazendo os ajustes nas respostas em desacordo com a teoria. Os estudantes então responderam um questionário que compõe a avaliação.

Na fase de rememoração ocorreu após uma rápida análise das respostas dos estudantes do questionário realizado e o conteúdo é revisto em seus tópicos relevantes de acordo com as respostas.

Para realizar os processos de generalização e desempenho, ao final do módulo, os estudantes respondem questões individualmente. As questões têm a intencionalidade de buscar a transferência do conteúdo aprendido com experimentos de relação prática com o cotidiano.

7. Avaliação

Os instrumentos elementos da avaliação foram as respostas dadas nos questionários aplicados, as respostas dos estudantes estão anexadas nos respectivos apêndices. Os desempenhos dos estudantes se mostram coerentes com alcance da aprendizagem de forma positiva no primeiro módulo.

Dois questionários foram aplicados durante a aula. Inicialmente com respostas em grupo, principalmente para fomentar a discussão, e posteriormente de forma individual para que os estudantes pudessem demonstrar seus próprios desempenhos.

A avaliação acima também pôde ser observada na percepção dos comentários durante a participação dos estudantes nas atividades e as discussões realizadas.

Questionário para discussão em grupo (Módulo 1)

- 1) O que é um sistema de referência? Explique dando um ou mais exemplos.
- 2) Qual é o significado de movimentos simultâneos independentes no princípio de Galileu?
- 3) É possível que exista pelo menos um movimento absoluto (que seja o mesmo quando visto por qualquer referencial)?

Questões (Módulo 1 – aulas 1 e 2)

- 1) É possível ver alguém em repouso, mesmo que esteja caminhando? Se a resposta for sim, descreva uma situação.
- 2) Um barco a motor anda num lago com as águas em repouso, em relação às margens, com velocidade de 30 km/h. Se o mesmo barco movesse num rio cuja velocidade da correnteza fosse de 27 km/h, subindo o rio (em sentido contrário ao da correnteza), qual seria a velocidade do barco na visão de um observador em repouso nas margens?
- 3) Um consumidor vai ao shopping para comprar um presente de aniversário. Muito apressado caminha a 6 km/h durante o tempo todo. Ao descer numa escada rolante atinge, caminhando no mesmo ritmo a velocidade de 10 km/h, pois recebe ajuda extra. Qual é a velocidade da escada?
- 4) Um barco atravessa um rio com velocidade $V_{rel} = 6$ m/s. A correnteza do rio tem velocidade $V_{arr} = 8$ m/s. Determine a velocidade resultante V_{res} da composição dos movimentos citados.

4.1.2. Módulo 2 – Teoria da Relatividade Restrita (aulas 3, 4, 5 e 6)

1. Identificação

Nível de ensino	Médio
Docente responsável	Giovanni Sesostres Ferreira Ribeiro
Área do conhecimento	Física
Tema do Módulo	Relatividade
Título (Tópico) da aula	Relatividade Restrita
Tipo predominante	Teórica
Duração prevista	4 aulas de 45 minutos cada (3h00)

2. Objetivo principal

Discutir tópicos de relatividade Restrita, visando compreender o fator de Lorentz, os postulados da teoria da relatividade restrita, a dilatação dos tempos e a contração dos comprimentos.

Objetivos Específicos

- a) Discutir a falha do modelo clássico para os movimentos em “altas velocidades”.
- b) Apresentar os princípios da Teoria da relatividade especial e entender o que levou Einstein a desenvolver sua teoria.
- c) Apresentar o experimento de Michelson-Morley e analisar os resultados experimentais que modificaram o pensamento do mundo científico sobre a existência do éter-luminífero.
- d) Utilizar uma transformada de Lorentz para movimentos relativos nos fenômenos em altas velocidades para identificar a dilatação dos tempos e a contração dos comprimentos.

3. Metodologia

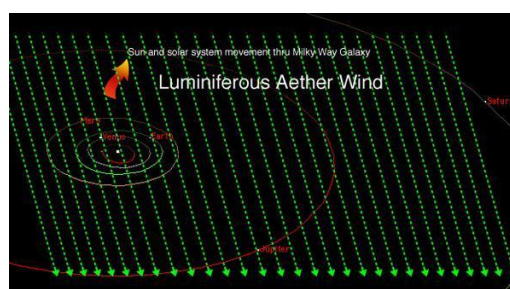
Esse e os demais módulos foram estruturados na teoria das hierarquias da aprendizagem de Robert Gagné, mesclando ideias do behaviorismo e do cognitivismo.

O presente módulo foi executado em dois encontros com uma aula dupla em cada, as aulas foram predominantemente teóricas, onde foram utilizadas as estratégias descritas a seguir.

Estratégias Didáticas (aulas 3 e 4):

- a) Iniciar a aula apresentando argumentos que sustentam a limitação das velocidades dos corpos pela velocidade da luz no vácuo. Como exemplo, usar o artigo sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. E se pudessemos movimentar na velocidade da luz, como veríamos uma onda eletromagnética que estivesse atrás de nós?
- b) Apresentar o experimento de Michelson-Morley que tinha o objetivo de comprovar a existência do Éter luminífero e que provou exatamente a inexistência.

Figura 19. Éter Luminífero.



Fonte: Calculadora de relatividade (2010).

- c) Apresentar os postulados da relatividade restrita.
- d) Deduzir e apresentar a transformada de Lorentz e confrontá-la com a transformada de Galileu.
- e) Dividir os estudantes em grupos de 5 integrantes e distribuir o questionário do apêndice 2A solicitando que respondam.

- f) Apresentar o paradoxo dos gêmeos e utilizar a transformada de Lorentz para a dilatação dos tempos entre referenciais inerciais.
- g) Dividir os estudantes em grupos de 5 integrantes e distribuir o questionário do apêndice 2B solicitando que respondam.
- h) Mediar uma discussão entre os grupos sobre os tópicos abordados, seguindo o roteiro constante do questionário do apêndice 2B e retomar os assuntos que não foram devidamente aprendidos.
- i) Pedir que os estudantes respondam, individualmente, ao questionário do apêndice 2C e em seguida que eles troquem os questionários entre si para que seja feita a correção pelo professor.
- j) Retomar os pontos deficitários de aprendizagem com base nas respostas do questionário do apêndice 2C.

Estratégias Didáticas (aulas 5 e 6):

- a) Iniciar o encontro rememorando os assuntos vistos no encontro anterior. Postulados da relatividade restrita, transformação de Lorentz e dilatação dos tempos entre referenciais inerciais.
- b) Apresentar a contração relativística do comprimento para um observador em repouso que analisa o tamanho de um objeto que se movimenta com velocidade comparável com a da luz no vácuo.
- c) Aplicar a transformada de Lorentz para a contração dos comprimentos.
- d) Dividir os estudantes em grupos de 5 integrantes e distribuir o questionário do apêndice 2D solicitando que respondam.
- e) Mediar uma discussão entre os grupos sobre os tópicos abordados, seguindo o roteiro constante do questionário do apêndice 2D e retomar os assuntos que não foram devidamente aprendidos.
- f) Explicar que o espaço e o tempo são entidades que juntas formam uma única grandeza física: o espaçotempo.
- g) Aplicar a transformada de Lorentz para a expansão da massa relativística.
- h) Dividir os estudantes em grupos de 5 integrantes e distribuir o questionário do apêndice 2E solicitando que respondam.
- i) Mediar uma discussão entre os grupos sobre os tópicos abordados, seguindo o roteiro constante do questionário do apêndice 2E e retomar os assuntos que não foram devidamente aprendidos.

4. Recursos utilizados

Durante a aplicação das aulas foram utilizados os seguintes recursos: Quadro branco/pincel, computador, projetor de imagens e vídeos e equipamento de áudio.

5. Referencial teórico

A aplicação do Módulo 2 – Relatividade Restrita, teve sustentação teórica nas Hierarquias de aprendizagem de Robert Gagné cujas etapas de aprendizagem devem ser seguidas e constantemente revisadas.

Na etapa da motivação a estratégia Behaviorista foi tanto utilizar a motivação por recompensa, já que as avaliações extraídas da aplicação compuseram parte da nota do quarto bimestre, quanto a motivação por expectativa, foi alcançada pelo próprio conteúdo pois os estudantes tiveram o primeiro contato com a Teoria da relatividade restrita.

Nas etapas de apreensão e aquisição o foco foi a apresentação de percepções não ortodoxas de espaço e tempo que tem andamentos distintos em referenciais inerciais, conforme preceituam os postulados da teoria da relatividade especial.

Nas etapas de retenção e rememoração os estudantes formaram grupos de discussão mediados pelo professor. Após as falas dos estudantes sobre os conteúdos da aula, o professor intervém nas respostas dando feedback positivo para as falas corretas e fazendo os ajustes nas respostas em desacordo com a teoria. Os estudantes então responderam os questionários que compõem a avaliação.

Na fase de rememoração ocorreu após uma rápida análise das respostas dos estudantes do questionário realizado e o conteúdo é revisto em seus tópicos relevantes de acordo com as respostas.

Para realizar os processos de generalização e desempenho, ao final do módulo, os estudantes respondem questões individualmente. As questões têm a intencionalidade de buscar a transferência do conteúdo aprendido com experimentos de relação prática com o cotidiano.

7. Avaliação

Os instrumentos elementos da avaliação foram as respostas dadas nos questionários aplicados, as respostas dos estudantes estão anexadas nos respectivos apêndices. Os desempenhos dos estudantes se mostram coerentes com alcance da aprendizagem de forma positiva no primeiro módulo.

Dois questionários foram aplicados durante cada aula. Inicialmente com respostas em grupo, principalmente para fomentar a discussão, e posteriormente de forma individual para que os estudantes pudessem demonstrar seus próprios desempenhos.

A avaliação acima também pôde ser observada na percepção dos comentários durante a participação dos estudantes nas atividades e as discussões realizadas.

Questionário para discussão em grupo (Módulo 2 – aulas 3 e 4)

- 1) Quem foi Albert Einstein?
- 2) Cite os postulados da Teoria da relatividade restrita.
- 3) Por que a teoria da relatividade de Galileu não pode ser aplicada acertadamente nos sistemas
- 4) O que é o éter luminífero?

Questões (Módulo 2 – aulas 3 e 4)

1) Em 2005, ano mundial da Física, comemora-se o centenário da teoria da relatividade de Albert Einstein. Entre outras consequências, esta teoria poria fim a ideia do éter, meio material necessário, semelhante ao som, através do qual a luz se propagava. O jargão popular “tudo é relativo” certamente não se deve a ele, pois seus postulados estão fundamentados em algo absoluto: a velocidade da luz no vácuo – 300.000 km/s.

Hoje sabe-se que:

- I. O som propaga-se no vácuo.
- II. A luz propaga-se no vácuo.
- III. A velocidade da luz no vácuo é a velocidade limite do universo.

É(são) verdadeira(s):

- a) todas.
 - b) nenhuma.
 - c) somente II.
 - d) II e III.
 - e) somente III.
- 2) Um astronauta é colocado a bordo de uma espaçonave e enviado para uma estação espacial a uma velocidade constante $v = 0,8c$, onde c é a velocidade da luz no vácuo. No referencial da aeronave, o tempo transcorrido entre o lançamento e a chegada na estação espacial foi de 12 meses. Qual o tempo transcorrido no referencial da terra, em meses?

3) Um conjunto de astronautas viaja a bordo de uma nave espacial permanecendo em missão no decorrer de 10 anos, medidos no relógio da nave. Ao retornar à Terra, os astronautas percebem que já se passaram alguns anos, então, considerando que a velocidade medida na nave era de $0,6c$, calcule quantos anos se passaram na terra.

- a) 12,5 anos
- b) 25 anos
- c) 10 anos
- d) 20 anos

Lista de Exercícios de Fixação – Rememoração: Dilatação do Tempo (Módulo 2 – aulas 3 e 4)

1) A relatividade proposta por Galileu e Newton na Física Clássica é reinterpretada pela teoria da relatividade restrita, proposta por Albert Einstein (1879-1955) em 1905, que é revolucionária porque mudou as ideias sobre o espaço e o tempo, uma vez que a anterior era aplicada somente a referenciais inerciais. Em 1915, Einstein propôs a teoria geral da relatividade válida para todos os referenciais (inerciais e não inerciais). Ainda acerca do assunto tratado no texto, resolva a seguinte situação-problema: Considere uma situação “fictícia”, que se configura como uma exemplificação da relatividade do tempo.

Um grupo de astronautas decide viajar numa nave espacial, ficando em missão durante seis anos, medidos no relógio da nave. Quando retornam à Terra, verifica-se que aqui se passaram alguns anos. Considerando que c é a velocidade da luz no vácuo e que a velocidade média da nave é $0,8c$, é correto afirmar que, ao retornarem a Terra, se passaram:

- a) 20 anos
- b) 10 anos
- c) 30 anos
- d) 12 anos
- e) 6 anos

2) Uma nave espacial se afasta de um planeta com velocidade de $0,2c$. Depois de um tempo ela envia um sinal de rádio ao planeta. Pensando nisso, calcule a velocidade do sinal obtido pelo observador que está na nave e por um observador que está no planeta.

- a) nula.
- b) c .
- c) $0,2c$.
- d) $0,3c$.
- e) $0,4c$.

3) Calcule quantos anos se passam na Terra enquanto uma tripulação viaja a bordo de uma nave espacial que se mantém em missão durante 5 anos, medidos no relógio da nave, com velocidade de $0,4c$.

- a) 4,5 anos
- b) 5 anos

- c) 5,5 anos
- d) 6 anos
- e) 6,5 anos

4) Um astronauta é colocado a bordo de uma espaçonave e enviado para uma estação espacial a uma velocidade constante $v = 0,8 c$, onde c é a velocidade da luz no vácuo. No referencial da espaçonave, o tempo transcorrido entre o lançamento e a chegada na estação espacial foi de 12 meses. Qual o tempo transcorrido no referencial da Terra, em meses?

Questionário para discussão em grupo (Módulo 2 – aulas 5 e 6)

- 1) O que ocorre com as medidas do tempo, do espaço e da velocidade da luz num referencial que se move com velocidade constante e em linha reta com valor próximo da velocidade da luz em relação a um observador fixo em repouso?
- 2) Como se comportariam as coordenadas do espaço de um sistema de referência em movimento que aumenta continuamente sua velocidade em relação a um referencial fixo?
- 3) Descreva o espaçotempo relativístico.

Questões (Módulo 2 – aulas 5 e 6)

- 1) Um móvel desloca-se a uma velocidade correspondente a 80 % da velocidade da luz, atravessando uma distância igual a 10 km, medida por um referencial em repouso. Calcule a distância percorrida pelo corpo em movimento.
 - a) 12 km
 - b) 6 km
 - c) 8 km
 - d) 16,6 km
 - e) 10 km
- 2) Em relação às dimensões perpendiculares à direção de movimento de um corpo que se move a uma velocidade relativística ($v \approx c$), marque a alternativa correta:
 - a) As dimensões diminuem de tamanho.
 - b) As dimensões aumentam de tamanho.
 - c) As dimensões mantêm-se do tamanho.
 - d) As dimensões oscilam, aumentando e diminuindo de tamanho periodicamente.

3) Um referencial que se move a uma velocidade de $0,6c$ mediu o comprimento de uma placa de trânsito e obteve a medida de 30 cm. O tamanho dessa placa em relação a um referencial em repouso é de:

- a) 24 cm
- b) 38 cm
- c) 37,5 cm
- d) 22 cm
- e) 18 cm

4.1.3. Módulo 3 – Relatividade Geral (aulas 7, 8, 9 e 10)

1. Identificação

Nível de ensino	Médio
Docente responsável	Giovanni Sesostres Ferreira Ribeiro
Área do conhecimento	Física
Tema do Módulo	Relatividade Geral
Título (Tópico) da aula	Relatividade Geral
Tipo predominante	Teórica
Duração prevista	4 aulas de 45 minutos cada (3h)

2. Objetivo principal

Discutir tópicos de relatividade geral, visando compreender a gravidade no espaçotempo.

3. Objetivos Específicos

- a) Apresentar o princípio da equivalência.
- b) Compreender a geometria do espaçotempo.
- c) Apresentar os efeitos da gravidade sobre a geometria do espaçotempo.

4. Metodologia

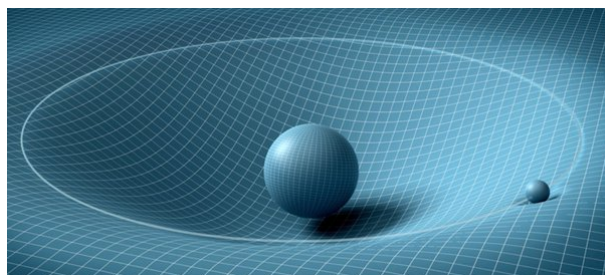
Esse e os demais módulos foram estruturados na teoria das hierarquias da aprendizagem de Robert Gagné, mesclando ideias do behaviorismo e do cognitivismo.

O presente módulo foi executado em dois encontros com duas aulas duplas, onde foram utilizadas as estratégias descritas a seguir.

Estratégias Didáticas (aulas 7 e 8):

- a) Iniciar a aula apresentando argumentos que demonstram os problemas da gravidade newtoniana:
 - A gravidade newtoniana não é compatível com a expansão acelerada do Universo
 - As galáxias que estão nas extremidades de grandes sistemas de outras galáxias giram muito rápido, mas permanecem agrupadas
- b) Apresentar o experimento mental de Einstein: "Um homem em queda livre não sente seu próprio peso."
- c) Comparar uma nave acelerada no espaço com um elevador em repouso na Terra. A seguir comparar uma nave sem aceleração no espaço (sem gravidade) com um elevador em queda livre na Terra.
- d) Dividir os estudantes em grupos de 5 integrantes e iniciar uma discussão com o tema: Por que a gravidade não é uma "força" na Relatividade Geral, mas sim uma geometria?
- e) Usar a figura 12 para simular a deformação do espaçotempo pela gravidade. Mencionar que uma atividade experimental similar ocorrerá no próximo encontro.

Figura 15. Deformação do espaçotempo.



Fonte: Universo Racionalista (2017).

- f) Explorar fenômenos observáveis da curvatura do espaçotempo. Desvio da luz de uma estrela durante um eclipse, ondas gravitacionais. Relógios em satélites GPS precisam corrigir efeitos relativísticos.
- g) Dividir os estudantes em grupos de 5 integrantes e distribuir o questionário do apêndice 3B solicitando que respondam.
- h) Mediar uma discussão entre os grupos sobre os tópicos abordados, seguindo o roteiro constante do questionário do apêndice 3A e 3B e retomar os assuntos que não foram devidamente aprendidos.
- i) Correção das questões pelo professor para retomar os pontos deficitários de aprendizagem com base nas respostas dos questionários.

Estratégias Didáticas (aulas 9 e 10):

k) Iniciar o encontro rememorando os assuntos vistos no encontro anterior. Tópicos da Relatividade Geral, princípio da equivalência e geometria do espaço-tempo.

l) Montar o experimento do tecido para simular as consequências da massa na geometria do espaço-tempo. Material utilizado: Tecido elástico (espaço-tempo), suporte de mesa de tampo circular, grampos de fixação, bola de bilhar (estrela) e bolas de tênis de mesa (planetas).

Figura 20. Tecido (Simulação: Espaço-tempo).



Fonte: Elaboração própria (2025).

m) Dividir os estudantes em grupos de 3 integrantes para realizar as tarefas do experimento:

- Lançar a bola de tênis de mesa sobre o tecido vazio e observar seu movimento.
- Com o tecido vazio, colocar a bola de bilhar no centro e observar a forma do tecido.

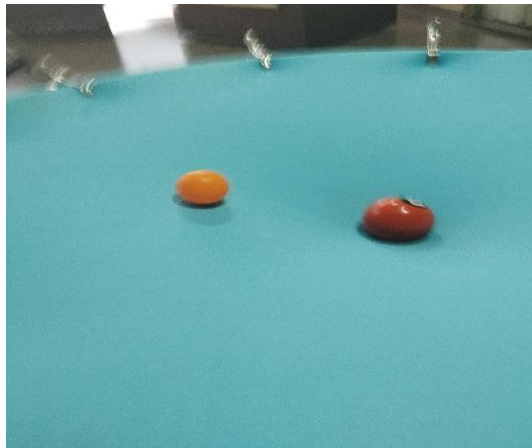
Figura 21. Deformação do espaço-tempo.



Fonte: Elaboração própria (2025).

- Lançar a bola de tênis de mesa sobre o tecido deformado pela bola de bilhar e descrever o movimento.

Figura 22. Efeito da deformação Espaço-tempo.



Fonte: Elaboração própria (2025).

- Lançar várias bolas de tênis de mesa sobre o tecido deformado pela bola de bilhar e descrever os movimentos.
 - Comparar o procedimento anterior com as órbitas dos planetas em torno do sol.
 - Oscilar objetos massivos para simular as ondas gravitacionais.
- o) Mediar uma discussão entre os grupos sobre os tópicos abordados, seguindo o roteiro constante do questionário do apêndice 3C e retomar os assuntos que não foram devidamente aprendidos.
- p) Explicar que o espaço e o tempo são entidades que juntas formam uma única grandeza física: o espaço-tempo.
- q) Explicar as aplicações da relatividade geral:
- Buracos negros
 - Lentes gravitacionais
 - Trajetórias dos planetas no espaço-tempo
- r) Dividir os estudantes em grupos de 5 integrantes e distribuir a lista de questões do apêndice 3D solicitando que respondam.
- s) Mediar uma discussão entre os grupos sobre os tópicos abordados, seguindo o roteiro constante do questionário dos apêndices 3C e 3D. Retomar os assuntos que não foram devidamente aprendidos.

5. Recursos utilizados

Durante a aplicação das aulas foram utilizados os seguintes recursos: Quadro branco/pincel, computador, projetor de imagens e vídeos, equipamento de áudio e equipamento experimental (tecido, estrutura de mesa redonda, prendedores, bola de bilhar, bolas de tênis de mesa).

6. Referencial teórico

A aplicação do Módulo 3 – Relatividade Geral, teve sustentação teórica nas Hierarquias de aprendizagem de Robert Gagné cujas etapas de aprendizagem devem ser seguidas e constantemente revisadas.

Na etapa da motivação a estratégia Behaviorista foi tanto utilizar a motivação por recompensa, já que as avaliações extraídas da aplicação compuseram parte da nota do quarto bimestre, quanto a motivação por expectativa, foi alcançada pelo próprio conteúdo pois os estudantes tiveram o primeiro contato com a Teoria da relatividade restrita.

Nas etapas de apreensão e aquisição o foco foi a apresentação de percepções não ortodoxas de espaço e tempo que tem andamentos distintos em referenciais inerciais, conforme preceituam os postulados da teoria da relatividade especial.

Nas etapas de retenção e memorização, os estudantes formaram grupos de discussão mediados pelo professor. Após as falas dos estudantes sobre os conteúdos da aula, o professor intervém nas respostas dando *feedback* positivo para as falas corretas e fazendo os ajustes nas respostas em desacordo com a teoria. Os estudantes então responderam os questionários que compõem a avaliação.

Na fase de memorização, que ocorreu após uma rápida análise das respostas dos estudantes do questionário realizado, o conteúdo foi revisto em seus tópicos relevantes de acordo com as respostas.

Para realizar os processos de generalização e desempenho, ao final do módulo, os estudantes respondem questões individualmente. As questões têm a intencionalidade de buscar a transferência do conteúdo aprendido com experimentos de relação prática com o cotidiano.

7. Avaliação

Os instrumentos elementos da avaliação foram as respostas dadas nos questionários aplicados, as respostas dos estudantes estão anexadas nos respectivos apêndices. Os desempenhos dos estudantes se mostram coerentes com alcance da aprendizagem de forma positiva no primeiro módulo.

Dois questionários foram aplicados durante cada aula. Inicialmente com respostas em grupo, principalmente para fomentar a discussão, e posteriormente de forma individual para que os estudantes pudessem demonstrar seus próprios desempenhos.

A avaliação obtida também pôde ser observada na percepção dos comentários durante a participação dos estudantes nas atividades e as discussões realizadas.

Questionário para discussão em grupo (Módulo 3 – aulas 7 e 8)

- 1) Explique o Princípio da Equivalência, proposto por Einstein, e sua relação com a ideia de que um referencial acelerado é indistinguível de um campo gravitacional.
- 2) Por que um referencial acelerado é indistinguível de um campo gravitacional?
- 3) Como a Teoria da Relatividade Geral descreve a gravidade de forma diferente da Física Newtoniana? Discuta o conceito de curvatura do espaço-tempo e sua relação com a massa e energia.
- 4) Um dos testes clássicos da Relatividade Geral é o desvio da luz de estrelas pelo Sol durante um eclipse. Explique por que esse fenômeno ocorre e como ele comprova a teoria de Einstein.

Questões (Módulo 3 – aulas 7 e 8)

- 1) O que são "ondas gravitacionais" e como sua detecção em 2015 (pelo LIGO) confirmou previsões da Relatividade Geral? Descreva o fenômeno físico envolvido.
- 2) Por que o tempo passa mais devagar em regiões com forte campo gravitacional (como próximo a um buraco negro)? Relacione esse efeito com o Princípio da Equivalência e a dilatação temporal gravitacional.
- 3) A Relatividade Geral prevê a existência de buracos negros. Explique como esses objetos extremos desafiam nossa compreensão clássica do espaço, tempo e gravidade.

Questionário para discussão em grupo (Módulo 3 – aulas 9 e 10)

- 1) Descreva a distorção do espaço-tempo representado no experimento proposto.
- 2) Descreva como a massa de um corpo altera a geometria do espaço-tempo à luz da teoria da relatividade geral.
- 3) Descreva a lente gravitacional, tomando como referência a imagem obtida do buraco negro (Figura 15) e no experimento realizado.

Questões (Módulo 3 – aulas 9 e 10)

- 1) O que significa a afirmação de Einstein de que "a matéria diz ao espaço-tempo como se curvar, e o espaço-tempo diz à matéria como se mover"?
- 2) Como a distorção do espaço-tempo explica a órbita dos planetas ao redor do Sol, diferentemente da visão newtoniana da gravidade?
- 3) Por que a luz de uma estrela distante se curva ao passar perto do Sol? Como esse fenômeno (lente gravitacional) está ligado à distorção do espaço-tempo?

4) Se um astronauta caísse em um buraco negro, um observador externo veria seu tempo desacelerar até "parar" no horizonte de eventos. Por que isso ocorre?

5. ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

O produto foi aplicado em uma turma do terceiro ano do Ensino Médio de uma escola pública (CEM01) localizada no Paranoá, cidade satélite do Distrito Federal. Essa turma era composta por um total de doze estudantes frequentes, os quais se dividiram em três grupos fixos, com os membros escolhidos por eles próprios, para realizarem as tarefas solicitadas. A metodologia aplicada previa momentos de debates com toda a turma, discussões em grupos e trabalhos individuais.

Uma característica dos estudantes da escola é o alto índice de ausências às aulas e a turma de aplicação não foge a esse padrão. Foram realizados cinco encontros com aulas duplas no total e a Tabela 3, a seguir, mostra a quantidade de faltas em cada aula, que resultou em uma média de 38,33% de estudantes ausentes por aula.

As ausências não se concentravam nos mesmos estudantes. Foram distribuídas de forma relativamente homogênea entre os estudantes. Apenas dois estudantes estiveram presentes em todas as aulas.

Tabela 1. Números de ausências (entre 12) dos estudantes às aulas.

Aula	Nº de Ausências	% de Ausências
1	4	33,33
2	4	33,33
3	2	16,67
4	2	16,67
5	6	50,00
6	6	50,00
7	8	66,67
8	8	66,67
9	7	58,33
10	7	58,33
Média	5,4	43,33

Fonte: Elaboração própria (2025).

Em relação à aplicação, foram realizados cinco encontros, totalizando dez horas aula. As próximas subseções fazem uma análise de como ocorreram as aulas com os estudantes e os resultados obtidos.

5.1. Resultados das aplicações das aulas em geral

As aulas ocorreram sem intercorrências de forma estruturadas e com razoável participação dos estudantes. Alguns estudantes demonstraram muito interesse pelo produto educacional e de maneira geral, a maioria colaborou de forma positiva participando das aulas e fazendo as atividades propostas. Após questionados pelo professor, os estudantes responderam de forma positiva sobre a

importância e relevância do conteúdo ministrado. Disseram também que gostaram dos assuntos abordados nessa aplicação.

Durante a aplicação, houve sempre a busca pela fidelidade da referência teórica abordada, respeitando as hierarquias da aprendizagem com a aplicação dos seus processos com análise individual dos objetivos alcançados e retomada dos assuntos pendentes.

Os estudantes demonstraram, como esperado, maior interesse nos momentos experimentais empíricos, nas simulações e principalmente na atividade experimental realizada em sala de aula. Os momentos de exposição dos conteúdos eram os que os estudantes participavam menos, mas nas discussões em grupo e nas realizações das atividades eles demonstravam mais entusiasmo.

As discussões realizadas tiveram boa participação dos estudantes e revelaram, em alguns poucos casos, a aprendizagem com retenção na memória de longa duração. A seguir, é feita uma análise de como ocorreu cada aula realizada.

5.1.1. Primeiro Encontro – módulo 1, aulas 1 e 2

Na primeira aula desse encontro, foram apresentados aos estudantes, inicialmente de maneira expositiva, os princípios do movimento relativo e do movimento composto na visão da Física clássica de Galileu. Em seguida, foram reproduzidos os vídeos: “Escada rolante”, “Esteira rolante do aeroporto” e “O barco e a correnteza”. Foi, então, apresentado o princípio da independência dos movimentos simultâneos de Galileu.

A seguir, foram apresentados os conteúdos que compõem o presente produto educacional, apontando as principais diferenças dos modelos da relatividade clássica e da física contemporânea por meio dos experimentos empíricos propostos por Einstein.

De modo contínuo, foram apresentados os experimentos empíricos da corrida do espelho com a velocidade da luz que, no modelo clássico, faria com que a imagem desaparecesse, bem como a lâmpada do vagão do trem que viaja a velocidade da luz deixaria de iluminar parte dele.

Alguns estudantes manifestaram-se surpresos das conclusões que o modelo clássico revelaria para as situações propostas nos experimentos empíricos e perguntaram se havia alguma situação prática que revelasse as distorções dos resultados. O professor respondeu que na sequência dos conteúdos programados nesse produto tudo seria esclarecido no devido tempo.

A seguir foi apresentado o conceito de referencial a partir dos elementos vistos nos vídeos e com as próprias estruturas da sala de aula. O professor solicitou que um estudante caminhasse pela sala segurando uma caneta e perguntou a ele e aos demais estudantes, que permaneceram sentados se a caneta estava parada ou em movimento.

O tempo transcorrido de aula até então foi de aproximadamente vinte minutos.

A turma foi dividida em dois grupos de quatro estudantes que tiveram quinze minutos para discussão mediada para responder o questionário 1, com três perguntas. Em seguida, o professor analisou junto com os grupos, as respostas dos questionários, reforçando as respostas exitosas e retomando os conceitos dos conteúdos que ainda representavam dúvidas, concluindo assim a primeira aula de quarenta e cinco minutos.

Na segunda aula do primeiro encontro, o professor, com auxílio de um projetor de imagens, apresentou os referenciais no modelo cartesiano do movimento relativo e explicou os parâmetros de espaço, tempo e velocidades numa transformada de galileu.

Apresentou, na sequência, as imagens do “barco atravessando a correnteza” para determinar a velocidade resultante com a soma vetorial, nas várias possibilidades de movimento relativo: barco a favor da correnteza, contra a correnteza, e perpendicular a correnteza.

Em seguida, os estudantes responderam individualmente a lista de questões 1, com o tempo de vinte minutos para conclusão das respostas.

O professor avaliou os estudantes ainda em sala de aula retomando os pontos relevantes com base nas respostas.

5.1.2. Segundo Encontro – módulo 2, aulas 3 e 4

Na primeira aula desse encontro, foi apresentado aos estudantes, inicialmente de maneira expositiva, os argumentos que sustentam a limitação das velocidades dos corpos pela velocidade da luz no vácuo por meio dos experimentos empíricos de Einstein. “O paradoxo do avô”, “A eletrodinâmica dos corpos em movimento”.

Em seguida, foi apresentado, com auxílio do retroprojetor, o experimento de Michelson-Morley para investigar a existência do éter-luminífero, suposto meio de propagação da onda eletromagnética. Nesse ponto, surgiram muitas dúvidas, já que os estudantes não tinham estudado nas séries anteriores o fenômeno da difração e interferência de ondas.

Nesse momento, fizemos uma rápida pesquisa na internet para visualizar os resultados de fenômenos ondulatórios pertinentes ao produto para que pudessem analisar os resultados experimentais do interferômetro de Michelson-Morley.

Foi questionado aos estudantes se os resultados experimentais do interferômetro estavam equivocados? E em seguida: a interpretação dos resultados foi mal feita?

Foram apresentados os postulados da relatividade restrita de Einstein juntamente com a transformada de Lorentz.

A turma foi dividida em dois grupos de cinco estudantes que tiveram vinte minutos para discussão mediada para responder o questionário 2 com quatro perguntas. Em seguida, o professor analisou junto com os grupos, as respostas dos questionários, reforçando as respostas exitosas e retomando os conceitos dos conteúdos que ainda representavam dúvidas, concluindo assim a primeira aula de quarenta e cinco minutos.

Foi apresentado “o paradoxo dos gêmeos” e utilizada a transformada de Lorentz para analisar a dilatação dos tempos entre referenciais inerciais, quebrando o paradigma clássico de tempo absoluto.

Então, os estudantes foram novamente divididos em grupos de 5 integrantes para discutir os assuntos abordados na aula e em seguida foi distribuído a lista de questões 2 para que respondessem individualmente. O professor mediu uma discussão entre os estudantes sobre os tópicos abordados, seguindo o roteiro constante da lista de questões 2 e retomou os assuntos que não foram devidamente aprendidos.

O professor avaliou os estudantes ainda em sala de aula retomando os pontos relevantes com base nas respostas.

5.1.1. Terceiro Encontro – módulo 2, aulas 5 e 6

Na primeira aula desse encontro, foram rememorados os assuntos vistos no encontro anterior: Postulados da relatividade restrita, transformação de Lorentz e dilatação dos tempos entre referenciais inerciais.

Foi solicitado aos estudantes que respondessem, individualmente, a uma lista de exercícios de retomada e em seguida que eles troquem os questionários entre si para que seja feita a correção conjuntamente com o professor.

O professor avaliou os estudantes em sala de aula retomando os pontos relevantes com base nas respostas apresentadas. Em seguida, foi apresentada a transformada de Lorentz para a contração dos comprimentos. O professor, com auxílio do retroprojeto, explicou que o espaço e o tempo são entidades que juntas formam uma única grandeza física: o espaçotempo.

A turma foi dividida em dois grupos de três estudantes que tiveram vinte minutos para discussão mediada para responder o questionário 3 com quatro perguntas. O professor mediu uma discussão entre os grupos sobre os tópicos abordados, seguindo o roteiro constante do questionário 3 e retomou os assuntos que não foram devidamente aprendidos.

De volta ao quadro branco e com auxílio do retroprojektor, foi aplicada a transformada de Lorentz para a expansão da massa relativística. Os estudantes foram novamente divididos em grupos de 3 integrantes para discutir os assuntos abordados na aula e em seguida foi distribuído a lista de questões 3 para que respondam individualmente. O professor mediou uma discussão entre os grupos sobre os tópicos abordados, seguindo o roteiro constante na lista de questões 3 e retomou os assuntos que não foram devidamente aprendidos.

5.1.3. Quarto Encontro – módulo 3, aulas 7 e 8

Na primeira aula desse encontro, foram apresentados aos estudantes, inicialmente de maneira expositiva, os argumentos que demonstram os problemas da gravidade newtoniana:

- A gravidade newtoniana não é compatível com a expansão acelerada do Universo.
- As galáxias que estão nas extremidades de grandes sistemas de outras galáxias giram muito rápido, mas permanecem agrupadas.

Foi apresentado o experimento mental de Einstein: "Um homem em queda livre não sente seu próprio peso" e comparado uma nave acelerada ($a = g$) no espaço com um elevador em repouso na Terra. A seguir comparar uma nave sem aceleração no espaço (sem gravidade) com um elevador em queda livre na Terra. Então, foi enunciado o Princípio da Equivalência.

A turma formou apenas um grupo de quatro estudantes que iniciou uma discussão com o tema: Por que a gravidade não é uma "força" na Relatividade Geral, mas sim uma geometria?

Usando a Figura 12, por meio do projetor, para simular a deformação do espaço-tempo pela gravidade. Foi proposta que uma atividade experimental similar ocorreria no próximo encontro.

Os estudantes perguntaram sobre as aplicações práticas sobre relatividade geral e o professor mencionou o eclipse em Sobral – CE que demonstrou a validade da teoria de Einstein. Outras situações como as ondas gravitacionais e as correções em satélites GPS também receberam destaque.

Novamente a turma foi dividida para que respondam o questionário 4. O professor mediou uma discussão entre os grupos sobre os tópicos abordados, seguindo o roteiro constante do questionário 4 e retomou os assuntos que não foram devidamente aprendidos. O professor avaliou os estudantes ainda em sala de aula pela aplicação da lista individual 4, retomando os pontos relevantes com base nas respostas.

5.1.4. Quinto Encontro – módulo 3, aulas 9 e 10

Na primeira aula desse encontro, foram rememorados os assuntos vistos no encontro anterior: Tópicos da relatividade Geral, Princípio da equivalência e geometria do espaço-tempo. Os

estudantes foram divididos em dois grupos de três integrantes para realizar as tarefas do experimento:

Montar o experimento do tecido para simular as consequências da massa na geometria do espaço-tempo. Material utilizado: Tecido elástico (espaçotempo), suporte de mesa de tampo circular, grampos de fixação, bola de bilhar (estrela) e bolas de tênis de mesa (planetas).

Figura 20. Simulação: Espaçotempo.



Fonte: Elaboração própria (2025).

- Lançar a bola de tênis de mesa sobre o tecido vazio e observar seu movimento.
- Com o tecido vazio, colocar a bola de bilhar no centro e observar a forma do tecido.

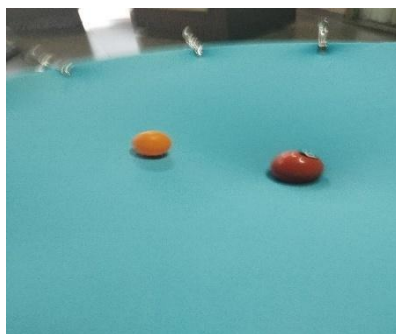
Figura 21. Simulação: Deformação do espaçotempo.



Fonte: Elaboração própria (2025).

- Lançar a bola de tênis de mesa sobre o tecido deformado pela bola de bilhar e descrever o movimento.

Figura 22. Efeito da deformação: Espaçotempo.



Fonte: Elaboração própria (2025).

- Lançar várias bolas de tênis de mesa sobre o tecido deformado pela bola de bilhar e descrever os movimentos.
- Comparar o procedimento anterior com as órbitas dos planetas em torno do sol.
- Oscilar objetos massivos para simular as ondas gravitacionais.

O professor mediou uma discussão entre os grupos sobre os tópicos abordados, seguindo o roteiro constante do questionário 5 e retomou os assuntos que não foram devidamente aprendidos. Foram abordadas as seguintes aplicações da teoria da relatividade geral:

- Buracos negros
- Lentes gravitacionais
- Trajetórias dos planetas no espacotempo

A seguir foi realizada uma rodada discussões sobre os tópicos abordados, seguindo o roteiro constante do questionário 5. Foram retomados os assuntos que não foram devidamente aprendidos. A seguir os estudantes responderam individualmente à lista de questões 5.

Ao final, foi aberta as falas dos estudantes para que avaliassem a aplicação nos aspectos de qualidade das aulas, aprendizagem efetiva e relevância dos conteúdos abordados. Esses aspectos estão listados nas considerações finais desse produto educacional.

5.2. Análise da Aprendizagem

5.2.1. Questionários em grupo e das questões individuais

No decorrer da aplicação do produto, foi solicitado aos estudantes que respondessem cinco questionários em grupo, com um total de dezessete questões, acerca dos temas abordados nas aulas.

Considerando as ausências às aulas, um total de 38 respostas foram analisadas e classificadas em quatro menções, conforme o grau de conhecimento demonstrado. Cada menção é descrita a seguir:

4: respostas que demonstram entendimento adequado do tema abordado.

3: respostas que demonstram entendimento intermediário do tema abordado.

2: respostas que demonstram entendimento precário do tema abordado.

1: respostas em desacordo com a matéria de ensino.

Os resultados são apresentados a seguir:

Questionário em grupo: Módulo 1 – Relatividade clássica de Galileu

Esse questionário foi respondido no decorrer da aula, sendo proposto após uma apresentação e discussão do conteúdo. Dois grupos com quatro estudantes participaram da atividade, com os resultados expostos na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2. Menções do questionário em grupo 1: Módulo 1 (aulas 1 e 2).

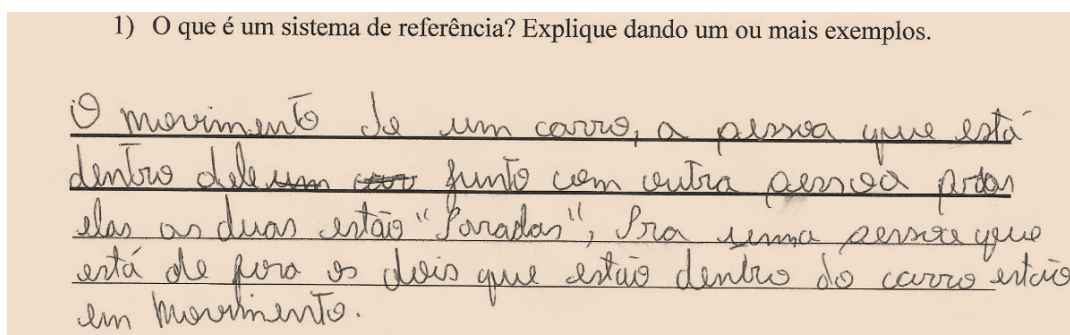
Questão	Grupo 1	Grupo 2
1	2	2
2	4	4
3	4	4

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os resultados obtidos demonstram um bom desempenho por parte dos estudantes com necessidade de pequenos ajustes em revisão do professor para seguir com a aplicação. A seguir, são apresentados dos resultados de cada questão:

A primeira questão foi respondida após os estudantes receberem a instrução sobre relatividade clássica: Referencial, movimento relativo e movimento composto. As figuras a seguir ilustram exemplos das respostas dos estudantes:

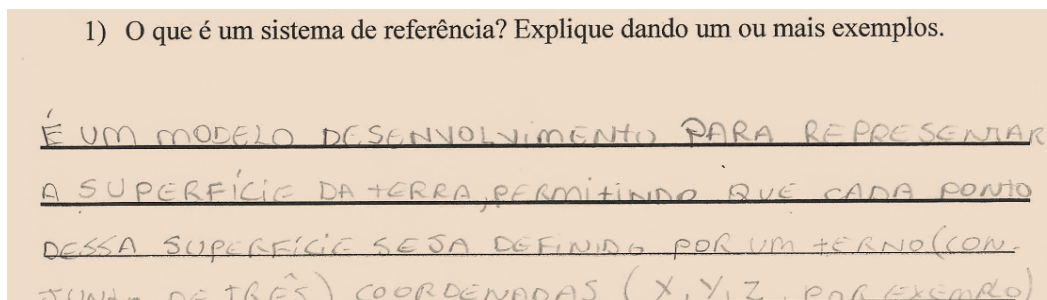
Figura 23. Primeira resposta para questão 1 do primeiro questionário.



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta evidencia que os estudantes relacionam movimentos relativos, mas demonstram a dificuldade de expressão textual de conceitos.

Figura 24. Segunda resposta para questão 1 do primeiro questionário.

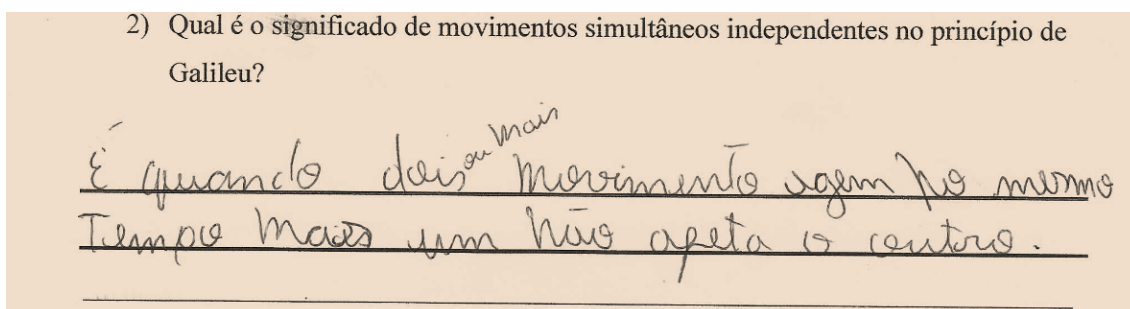


Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta evidencia a dificuldade de expressão textual de conceitos. Mas demonstra relação com o assunto abordado.

A segunda questão foi respondida na sequência e sob os mesmos atos preparatórios da questão anterior. As figuras a seguir ilustram exemplos das respostas dos estudantes:

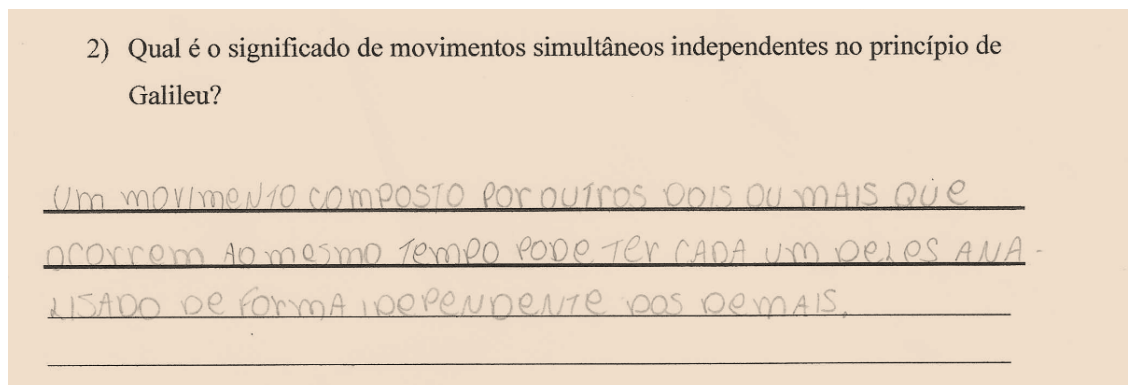
Figura 25. Primeira resposta para questão 2 do primeiro questionário.



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 26. Segunda resposta para questão 2 do primeiro questionário.



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

A terceira questão foi respondida na sequência e sob os mesmos atos preparatórios da questão anterior.

Figura 27. Primeira resposta para questão 3 do primeiro questionário.

3) É possível que exista pelo menos um movimento absoluto (que seja o mesmo quando visto por qualquer referencial)?

Não existe um corpo em movimento para todos verem

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 28. Segunda resposta para questão 3 do primeiro questionário.

3) É possível que exista pelo menos um movimento absoluto.(que seja o mesmo quando visto por qualquer referencial)?

Não é possível.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Questões individuais: Módulo 1 – Relatividade clássica de Galileu

Esse questionário foi respondido individualmente por oito estudantes presentes, na parte final da aula, sendo proposto após uma a apresentação e discussão do conteúdo. Os resultados são expostos na Tabela 3 a seguir:

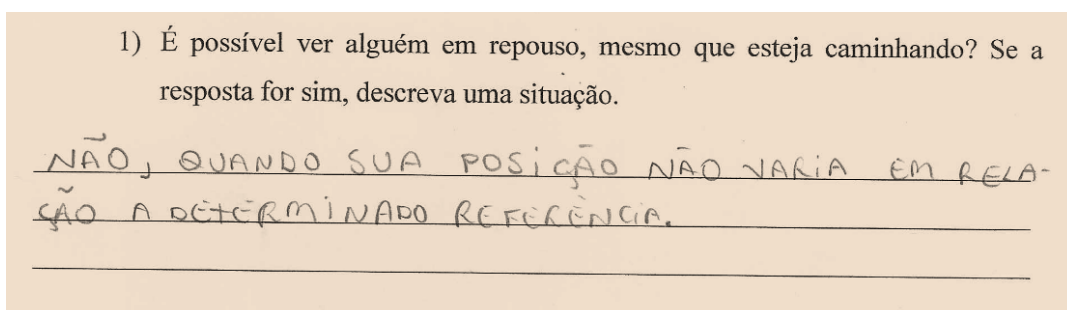
Tabela 3. Menções das questões individuais 1: Módulo 1 (aulas 1 e 2).

Questão	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
1	4	1	1	3	3	4	4	3
2	4	4	4	4	4	4	4	4
3	1	1	1	1	1	1	1	1
4	4	4	4	4	3	4	4	4

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os resultados obtidos demonstram um razoável desempenho por parte dos estudantes com necessidade de ajustes em revisão do professor para seguir com a aplicação. A seguir, são apresentados dos resultados de cada questão:

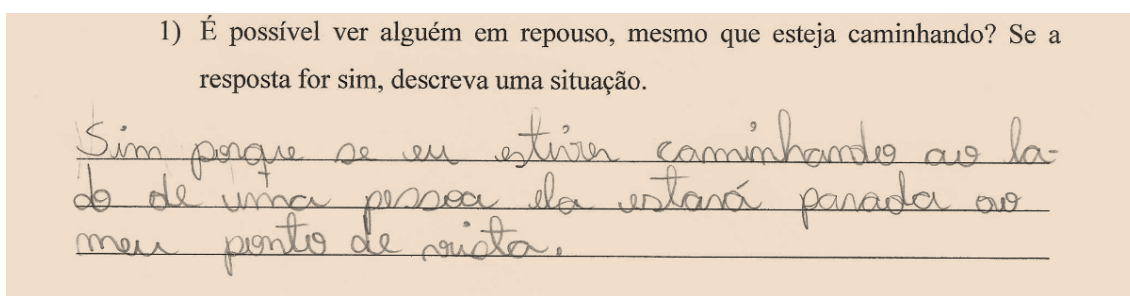
Figura 29. Primeira resposta para questão 1 do módulo 1 (individuais1)



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta evidencia a dificuldade de expressão textual de conceitos. Mas demonstra relação com o assunto abordado.

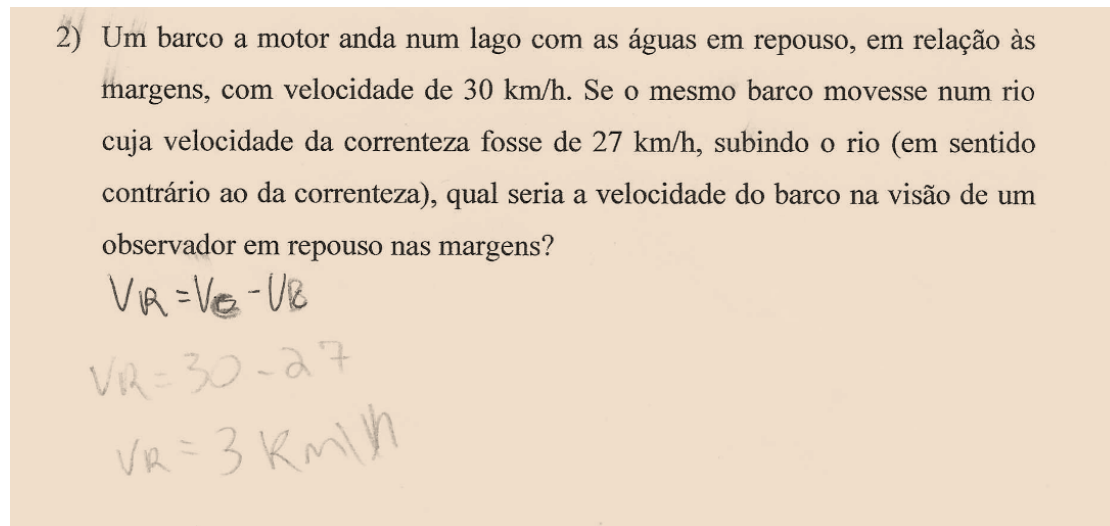
Figura 30. Segunda resposta para questão 1 do módulo 1 (individuais1)



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

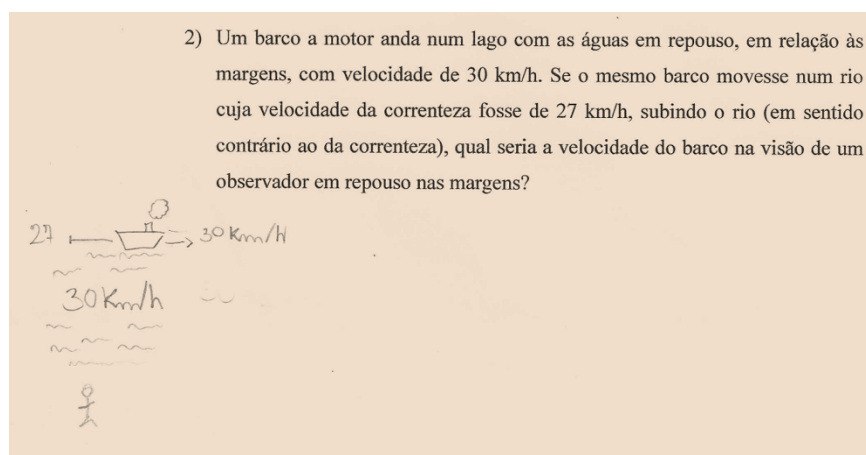
Figura 31. Primeira resposta para questão 2 do módulo 1 (individuais1).



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 32. Segunda resposta para questão 2 do módulo 1 (individuais1)



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta evidencia a dificuldade de expressão textual de conceitos. Mas demonstra relação com o assunto abordado.

Figura 33. Primeira resposta para questão 3 do módulo 1 (individuais1).

3) Um consumidor vai ao shopping para comprar um presente de aniversário. Muito apressado caminha a 6 km/h durante o tempo todo. Ao descer numa escada rolante atinge, caminhando no mesmo ritmo a velocidade de 10 km/h, pois recebe ajuda extra. Qual é a velocidade da escada?

Velocidade da escada é igual a 4 km/h
 $6 + v_E = 10$

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 34. Segunda resposta para questão 3 do módulo 1 (individuais1).

3) Um consumidor vai ao shopping para comprar um presente de aniversário. Muito apressado caminha a 6 km/h durante o tempo todo. Ao descer numa escada rolante atinge, caminhando no mesmo ritmo a velocidade de 10 km/h, pois recebe ajuda extra. Qual é a velocidade da escada?

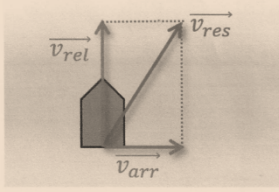
$v_R = v_C - v_B$
 $v_R = 10 - 6$
 $v_R = 4 \text{ km/h}$

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 35. Primeira resposta para questão 4 do módulo 1 (individuais1).

4) Um barco atravessa um rio com velocidade $v_{rel} = 6 \text{ m/s}$. A correnteza do rio tem velocidade $v_{arr} = 8 \text{ m/s}$. Determine a velocidade resultante v_{res} da composição dos movimentos citados.

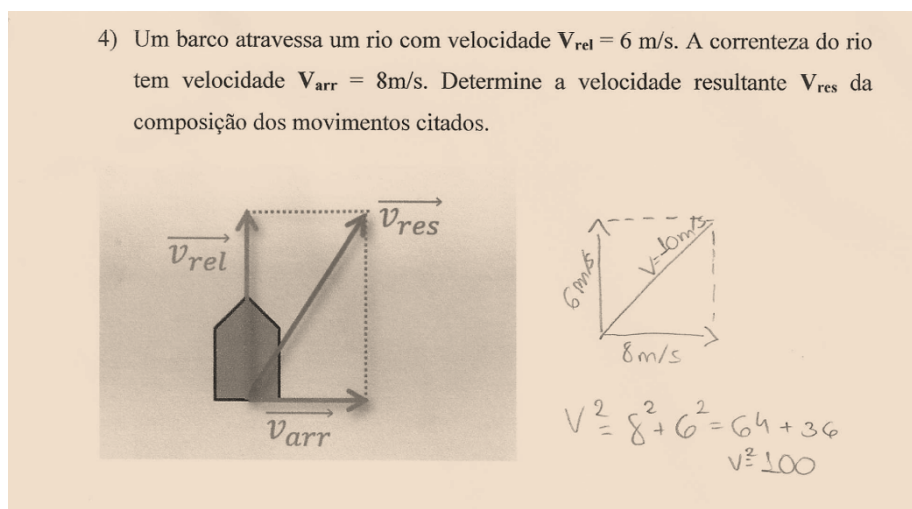


$v_R^2 = v_C^2 + v_B^2$
 $v_R = \sqrt{6^2 + 8^2}$
 $v_R = \sqrt{36 + 64} = 10 \text{ km/h}$
 $v_R = 10 \text{ km/h}$

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 36. Segunda resposta para questão 4 do módulo 1 (individuais1).



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Questionário em grupo: Módulo 2. Relatividade Especial (aulas 3 e 4)

Esse questionário foi respondido no decorrer da aula, sendo proposto após uma a apresentação e discussão do conteúdo. Dois grupos com cinco estudantes participaram da atividade, com os resultados expostos na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4. Menções do questionário em grupo 2: Módulo 2 (aulas 3 e 4).

Questão	Grupo 1	Grupo 2
1	4	2
2	4	2
3	1	4
4	4	4

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os resultados obtidos demonstram um razoável desempenho por parte dos estudantes com necessidade de ajustes em revisão do professor para seguir com a aplicação. A seguir, são apresentados dos resultados de cada questão:

A primeira questão foi respondida após os estudantes receberem a instrução sobre fatos históricos da relatividade restrita, o experimento de Michelson-Morley, os experimentos empíricos de Einstein e os postulados da relatividade restrita.

Figura 37. Primeira resposta para questão 1 do segundo questionário.

1) Quem foi Albert Einstein?
FOI UM FÍSICO ALEMÃO, FOI UMA DAS MENTES MAIS BRILHANTES DA CIÊNCIA, SEU LEGADO INCLUI A EXPLICAÇÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO, A FORMULAÇÃO DA TEORIA DA RELATIVIDADE ESPACIAL GERAL E RESTRITA, ALÉ DE GRANDES CONTRIBUIÇÃO PARA A FÍSICA ESTATÍSTICA, MOVIMENTO BROWNIANO.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 38. Segunda resposta para questão 1 do segundo questionário.

1) Quem foi Albert Einstein?
foi um físico alemão que desenvolveu a Teoria da relatividade.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta evidencia a dificuldade de expressão textual de conceitos. Mas demonstra relação com o assunto abordado.

A segunda questão foi respondida na sequência e sob os mesmos atos preparatórios da questão anterior.

Figura 39. Primeira resposta para questão 2 do segundo questionário.

2) Cite os postulados da Teoria da relatividade restrita?
1) a luz da natureza ou da física, não se comporta para todos os referenciais inerciais.
2) a velocidade de propagação da luz no vácuo é constante, independente do movimento da fonte e tem o mesmo valor para quaisquer referenciais inerciais.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 40. Segunda resposta para questão 2 do segundo questionário.

2) Cite os postulados da Teoria da relatividade restrita?

- 1- Princípios da relatividade
- 2- Constância da velocidade da luz.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta evidencia a dificuldade de expressão textual de conceitos. Mas demonstra relação com o assunto abordado.

A terceira questão foi respondida na sequência e sob os mesmos atos preparatórios da questão anterior.

Figura 41. Primeira resposta para questão 3 do segundo questionário.

3) Por que a teoria da relatividade de Galileu não pode ser aplicada acertadamente nos sistemas de referência que se deslocam com velocidades comparáveis a velocidade da luz?

O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE DE GALILEU NOS DIZ QUE AS LEIS DE MECÂNICA SERÃO VÁLIDAS EM TODOS OS REFERÊNCIAS QUE ESTEJAM EM MOVIMENTO REtil-NEO UNIFORME, UM EM RELAÇÃO AO OUTRO.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta não tem coerência com o que foi perguntado, demonstrando que não houve aprendizagem do tópico.

Figura 42. Segunda resposta para questão 3 do segundo questionário.

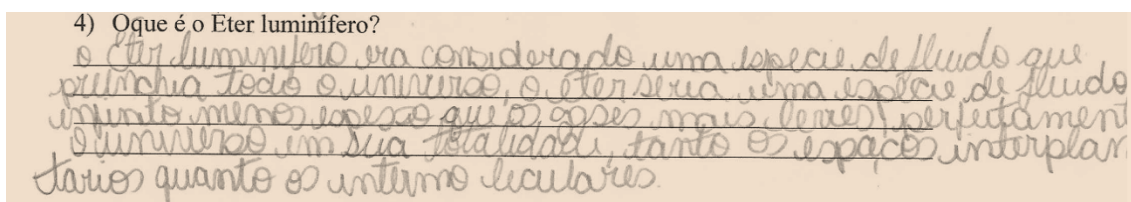
3) Por que a teoria da relatividade de Galileu não pode ser aplicada acertadamente nos sistemas de referência que se deslocam com velocidades comparáveis a velocidade da luz?

A Teoria de Galileu não se aplica a velocidades próximas a da luz por causa de Adição de Velocidades, Dilatação do Tempo, Contração de comprimento e Constância da Velocidade da luz.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

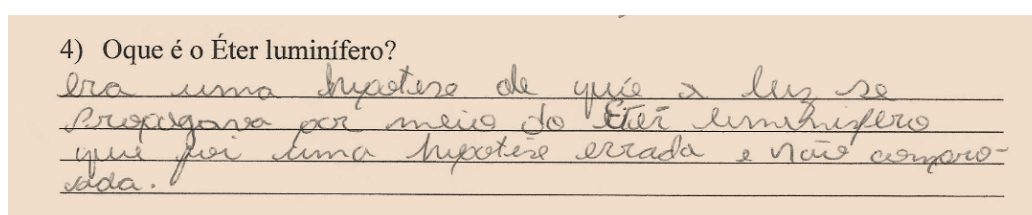
Figura 43. Primeira resposta para questão 4 do segundo questionário.



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 44. Segunda resposta para questão 4 do segundo questionário.



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Questões individuais: Módulo 2 (aulas 3 e 4)

Esse questionário foi respondido individualmente por dez estudantes presentes, na parte final da aula, sendo proposto após uma a apresentação e discussão do conteúdo. Os resultados são expostos na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5. Menções das questões 2: Módulo 2 (aulas 3 e 4).

Questão	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
1	4	4	4	2	2	4	4	4	2	4
2	4	4	4	4	3	4	3	3	3	4
3	4	4	4	1	1	3	2	3	1	4

Fonte: Elaboração própria (2025).

A primeira questão, objetiva, foi respondida de forma assertiva por 90% dos estudantes, após receberem a instrução sobre relatividade especial: Princípios da teoria da relatividade especial, transformada de Lorentz, dilatação do tempo. As figuras a seguir ilustram exemplos das respostas dos estudantes para as demais questões:

A segunda questão foi respondida na sequência e sob os mesmos atos preparatórios da questão anterior.

Figura 45 – Primeira resposta para questão 2 do módulo 2(individuais2).

2) Um astronauta é colocado a bordo de uma espaçonave e enviado para uma estação espacial a uma velocidade constante $v = 0,8 c$, onde c é a velocidade da luz no vácuo. No referencial da espaçonave, o tempo transcorrido entre o lançamento e a chegada na estação espacial foi de 12 meses. Qual o tempo transcorrido no referencial da Terra, em meses?

Calcule

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = \frac{12}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}} = \frac{12}{\sqrt{1 - 0,64}} = \frac{12}{\sqrt{0,36}} = \frac{12}{0,6} = 20 \text{ meses}$$

Resp.

No referencial da terra, o tempo transcorrido entre o lançamento e a chegada da espaçonave na estação espacial é de 20 meses.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 46. Segunda resposta para questão 2 do módulo 2(individuais2).

2) Um astronauta é colocado a bordo de uma espaçonave e enviado para uma estação espacial a uma velocidade constante $v = 0,8 c$, onde c é a velocidade da luz no vácuo. No referencial da espaçonave, o tempo transcorrido entre o lançamento e a chegada na estação espacial foi de 12 meses. Qual o tempo transcorrido no referencial da Terra, em meses?

Calcule

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = \frac{12}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}} = \frac{12}{\sqrt{1 - 0,64}} = \frac{12}{\sqrt{0,36}} = \frac{12}{0,6} = 20 \text{ meses}$$

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

A terceira questão, objetiva, foi respondida de forma assertiva pela maioria dos estudantes, após receberem a instrução sobre relatividade especial: Princípios da teoria da relatividade especial, transformada de Lorentz, dilatação do tempo.

Questão 2.3

Figura 47 – Primeira resposta para questão 3 do módulo 2(individuais2).

3) Um conjunto de astronautas viaja a bordo de uma nave espacial permanecendo em missão no decorrer de 10 anos, medidos no relógio da nave. Ao retornar à Terra, os astronautas percebem que já se passaram alguns anos, então, considerando que a velocidade medida da nave era de $0,6c$, calcule quantos anos se passaram na Terra.

☒ a) 12,5 anos
☐ b) 25 anos
☐ c) 10 anos
☐ d) 20 anos

Handwritten solution:

$$\Delta T = \gamma \Delta T_0$$

$$\Delta T = \frac{\Delta T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta T = \frac{10}{\sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}}$$

$$\Delta T = \frac{10}{\sqrt{1 - 0,36}}$$

$$\Delta T = \frac{10}{\sqrt{0,64}}$$

$$\Delta T = \frac{10}{0,8}$$

$$\Delta T = 12,5 \text{ anos}$$

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 48. Segunda resposta para questão 3 do módulo 2(individuais2).

3) Um conjunto de astronautas viaja a bordo de uma nave espacial permanecendo em missão no decorrer de 10 anos, medidos no relógio da nave. Ao retornar à Terra, os astronautas percebem que já se passaram alguns anos, então, considerando que a velocidade medida da nave era de $0,6c$, calcule quantos anos se passaram na Terra.

a) 12,5 anos
☒ b) 25 anos
☐ c) 10 anos
☐ d) 20 anos

Fonte: Arquivo do autor (2025).

Questionário em grupo 3 – Relatividade Especial (aulas 5 e 6)

Esse questionário foi respondido no decorrer da aula, sendo proposto após uma a apresentação e discussão do conteúdo. Dois grupos com três estudantes participaram da atividade, com os resultados expostos na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6. Menções do questionário em grupo 3: Módulo 2 (aulas 5 e 6).

Questão	Grupo 1	Grupo 2
1	4	4

2	4	1
3	2	4

Fonte: Arquivo do autor (2025).

Os resultados obtidos demonstram um razoável desempenho por parte dos estudantes com necessidade de ajustes em revisão do professor para seguir com a aplicação.

A seguir, são apresentados dos resultados de cada questão:

A primeira questão foi respondida após os estudantes receberem a instrução sobre fatos históricos da relatividade restrita, o experimento de Michelson-Morley, os experimentos empíricos de Einstein e os postulados da relatividade restrita.

Figura 49. Primeira resposta para questão 1 do terceiro questionário.

- 1) O que ocorre com as medidas do tempo, do espaço e da velocidade da luz num referencial que se move com velocidade constante e em linha reta com valor próximo da velocidade da luz em relação a um observador fixo em repouso?

O tempo parece mais devagar para quem está dentro do trem, e espaço, diminui para quem está fora do trem e a luz se mantém constante pois ela é imutável.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 50. Segunda resposta para questão 1 do terceiro questionário.

- 1) O que ocorre com as medidas do tempo, do espaço e da velocidade da luz num referencial que se move com velocidade constante e em linha reta com valor próximo da velocidade da luz em relação a um observador fixo em repouso?

dilatação do tempo, o tempo passa devagar para o objeto em movimento em comparação com o observador em repouso. Contração do espaço: o espaço também é afetado, para o observador em repouso, a distância percorrida pelo objeto em movimento, parece ser menor do que realmente é.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

A segunda questão foi respondida na sequência e sob os mesmos atos preparatórios da questão anterior.

Figura 51. Primeira resposta para questão 2 do terceiro questionário.

- 2) Como se comportariam as coordenadas do espaço de um sistema de referência em movimento que aumenta continuamente sua velocidade em relação a um referencial fixo?

Em relação a coordenada "x" ela se "a-
daptaria" de acordo, e em relação a "y" se mantém
igual.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 52. Segunda resposta para questão 2 do terceiro questionário.

2) Como se comportariam as coordenadas do espaço de um sistema de referência em movimento que aumenta continuamente sua velocidade em relação a um referencial fixo?

as coordenadas espaciais de um sistema em movimento acelerado mudam de forma não linear em relação a um referencial fixo. A aceleração contínua implica em transformações complexas (como as de Rindler) para descrever essa mudança e efeitos relativísticos como a dilatação do tempo também influenciam a percepção dessas coordenadas.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta evidencia a expressão de conceitos que sequer foram abordados. Resposta desconexa.

A terceira questão foi respondida na sequência e sob os mesmos atos preparatórios da questão anterior.

Figura 53. Primeira resposta para questão 3 do terceiro questionário.

3) Descreva o espaço-tempo relativístico.

Na visão de Einstein o espaço-tempo relativístico é como um tecido. Um não se rompe nunca.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta tem certa relação com o tema, mas demonstra que não houve aprendizagem satisfatória do tópico.

Figura 54. Segunda resposta para questão 3 do terceiro questionário.

3) Descreva o espaço-tempo relativístico.

O espaço-tempo relativístico, segundo Einstein, une espaço e tempo em uma única estrutura quadridimensional. A massa e energia curvam esse espaço-tempo, quando o que percebemos como gravidade. Velocidades próximas à da luz causam dilatação do tempo (o tempo passa mais devagar para objetos em alta velocidade).

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Questões individuais 3 – (aulas 5 e 6)

Esse questionário foi respondido individualmente por dez estudantes presentes, na parte final da aula, sendo proposto após uma a apresentação e discussão do conteúdo. Os resultados são expostos na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7. Menções das questões individuais 3: Módulo 2 (aulas 5 e 6)

Questão	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	4	1	4	1	1	1
2	1	4	4	1	4	4
3	4	4	4	1	1	1

Fonte: Elaboração própria (2025).

Questões individuais 3 – Relatividade Especial (aulas 5 e 6)

A primeira questão, objetiva, foi respondida de forma dividida entre os estudantes, após receberem a instrução sobre relatividade especial: Princípios da teoria da relatividade especial, transformada de Lorentz, dilatação do tempo.

As figuras a seguir ilustram exemplos das respostas dos estudantes para as demais questões:

Figura 55. Primeira resposta para questão 1 do módulo 2 (individuais3).

1) Um móvel desloca-se a uma velocidade correspondente a 80 % da velocidade da luz, atravessando uma distância igual a 10 km, medida por um referencial em repouso. Calcule a distância percorrida pelo corpo em movimento.

a) 12 km
b) 6 km
c) 8 km
~~d) 16,6 km~~
e) 10 km

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$l = \frac{l_0}{\gamma}$$

$$l = \frac{10}{1,666} = 6$$

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 56. Segunda resposta para questão 1 do módulo 2 (individuais3).

1) Um móvel desloca-se a uma velocidade correspondente a 80 % da velocidade da luz, atravessando uma distância igual a 10 km, medida por um referencial em repouso. Calcule a distância percorrida pelo corpo em movimento.

- a) 12 km
- b) 6 km
- c) 8 km
- d) 16,6 km
- ☒ e) 10 km

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A segunda questão foi respondida na sequência e sob os mesmos atos preparatórios da questão anterior.

Figura 57. Primeira resposta para questão 2 do módulo 2(individuais3).

2) Em relação às dimensões perpendiculares à direção de movimento de um corpo que se move a uma velocidade relativística ($v \approx c$), marque a alternativa correta:

- ☒ a) As dimensões diminuem de tamanho.
- b) As dimensões aumentam de tamanho.
- c) As dimensões mantêm-se do mesmo tamanho
- d) As dimensões oscilam, aumentando e diminuindo de tamanho periodicamente.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta não tem coerência com o que foi perguntado, demonstrando que não houve aprendizagem do tópico.

Figura 58. Segunda resposta para questão 2 do módulo 2 (individuais3).

2) Em relação às dimensões perpendiculares à direção de movimento de um corpo que se move a uma velocidade relativística ($v \approx c$), marque a alternativa correta:

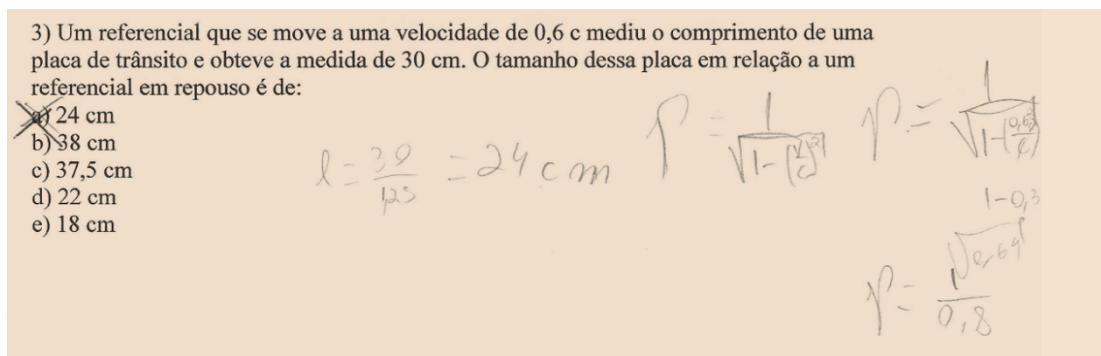
- a) As dimensões diminuem de tamanho.
- b) As dimensões aumentam de tamanho.
- ☒ c) As dimensões mantêm-se do mesmo tamanho
- d) As dimensões oscilam, aumentando e diminuindo de tamanho periodicamente.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

A terceira questão, objetiva, foi respondida de forma assertiva pela maioria dos estudantes, após receberem a instrução sobre relatividade especial: Princípios da teoria da relatividade especial, transformada de Lorentz, dilatação do tempo.

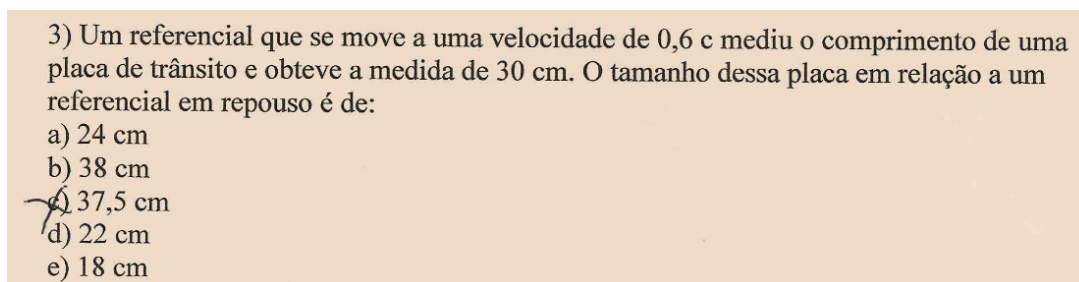
Figura 59. Primeira resposta para questão 2 do módulo 2(individuais3).



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 60. Segunda resposta para questão 3 do módulo 2(individuais3).



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta é aleatória e desconexa com o tema abordado, não tem coerência com o que foi perguntado, demonstrando que não houve aprendizagem do tópico. Esse fato se repetiu por três vezes.

Questionário em grupo 4 – Relatividade Geral (módulo 3, aulas 7 e 8)

Esse questionário foi respondido no decorrer da aula, sendo proposto após uma a apresentação e discussão do conteúdo. Um grupo com quatro estudantes participaram da atividade, com os resultados expostos na Tabela 8 a seguir:

Tabela 8. Menções do questionário em grupo (Módulo 3)

Questão	Grupo 1
1	4
2	3

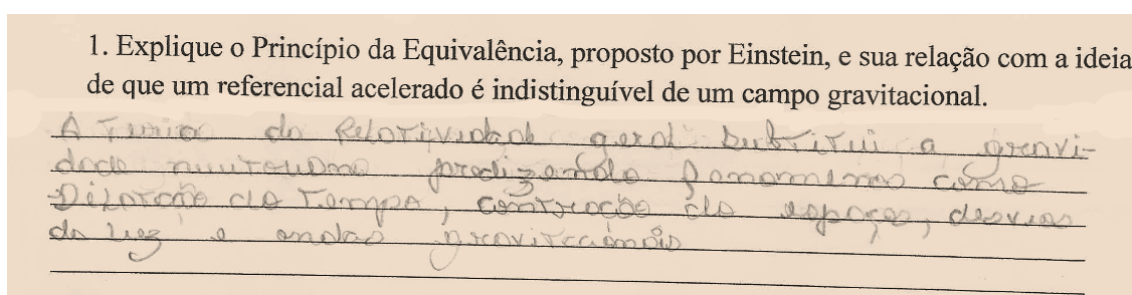
3	4
4	4

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os resultados obtidos demonstram um razoável desempenho por parte dos estudantes com necessidade de ajustes em revisão do professor para seguir com a aplicação.

A seguir, são apresentados dos resultados de cada questão:

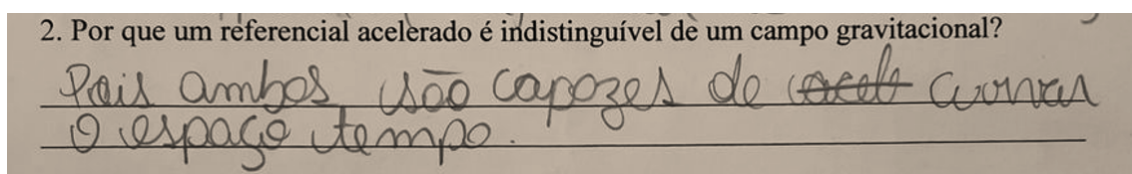
Figura 61. Resposta para questão 1 do quarto questionário.



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 62. Resposta para questão 2 do quarto questionário.



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta tem relação com a pergunta, mas não demonstra aprendizagem adequada sobre o tema abordado.

Figura 63. Resposta para questão 3 do quarto questionário.

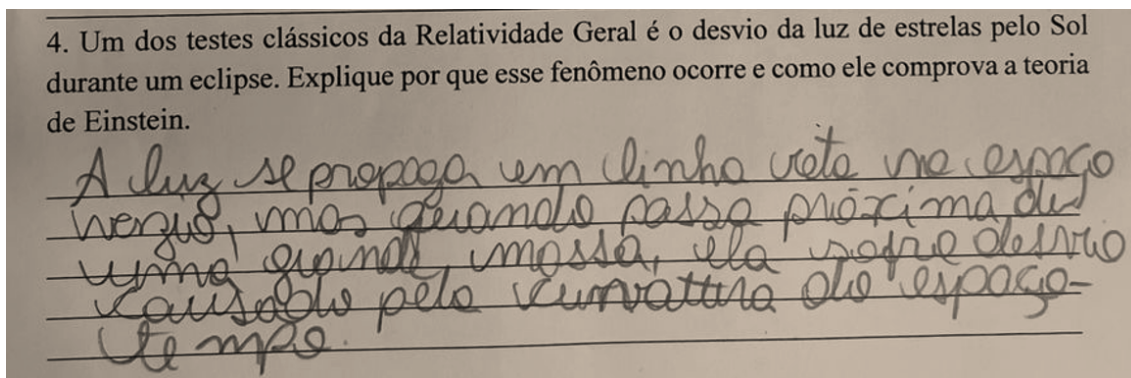
3. Como a Teoria da Relatividade Geral descreve a gravidade de forma diferente da Física Newtoniana? Discuta o conceito de curvatura do espaço-tempo e sua relação com a massa e energia.

Para Einstein a gravidade não é uma
força no sentido clássico, mas sim
uma consequência da geometria do
universo.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 64. Resposta para questão 4 do quarto questionário.



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Questões individuais 4 (módulo 3, aulas 7 e 8)

Esse questionário foi respondido individualmente por quatro estudantes presentes, na parte final da aula, sendo proposto após uma a apresentação e discussão do conteúdo. Os resultados são expostos na Tabela 9 a seguir:

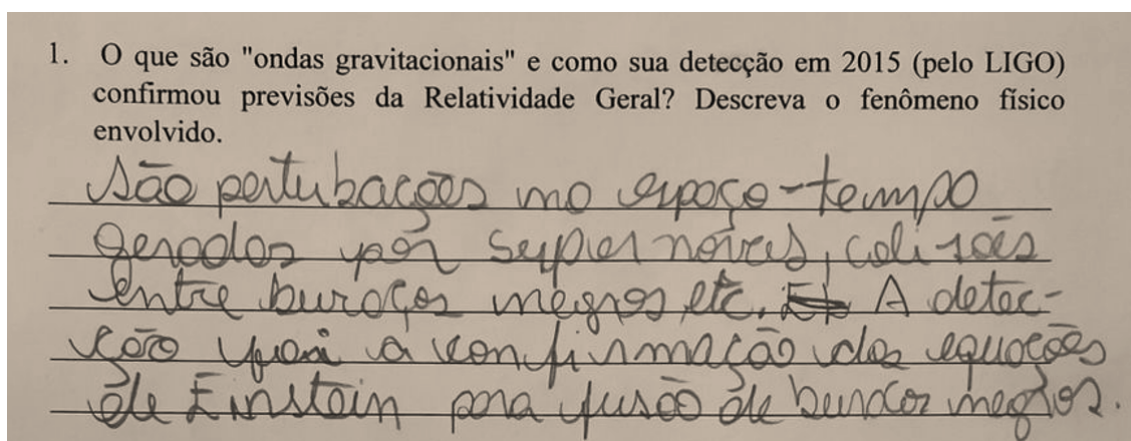
Tabela 9. Menções das questões 4: Módulo 3 (aulas 7 e 8).

Questão	E1	E2	E3	E4
1	4	4	4	2
2	4	4	4	4
3	4	4	4	1

Fonte: Elaboração própria (2025).

As figuras a seguir ilustram exemplos das respostas dos estudantes para as questões:

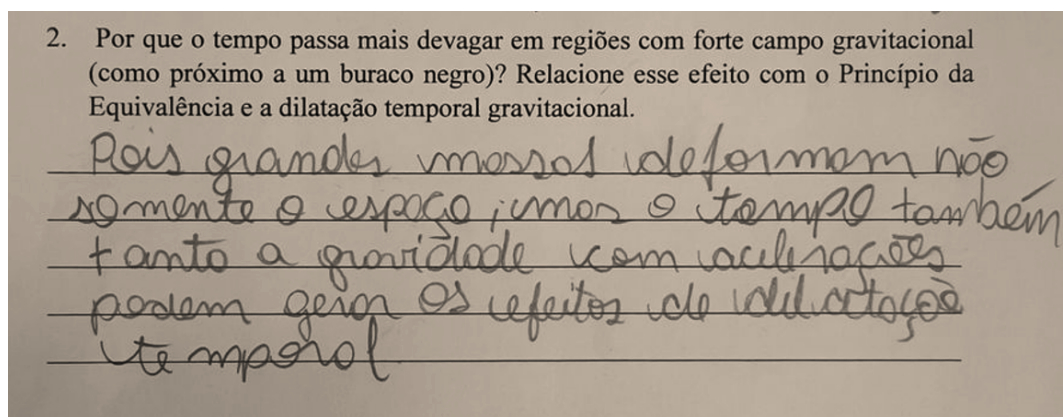
Figura 65. Resposta para questão 1 do módulo 3 (individuais 4).



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

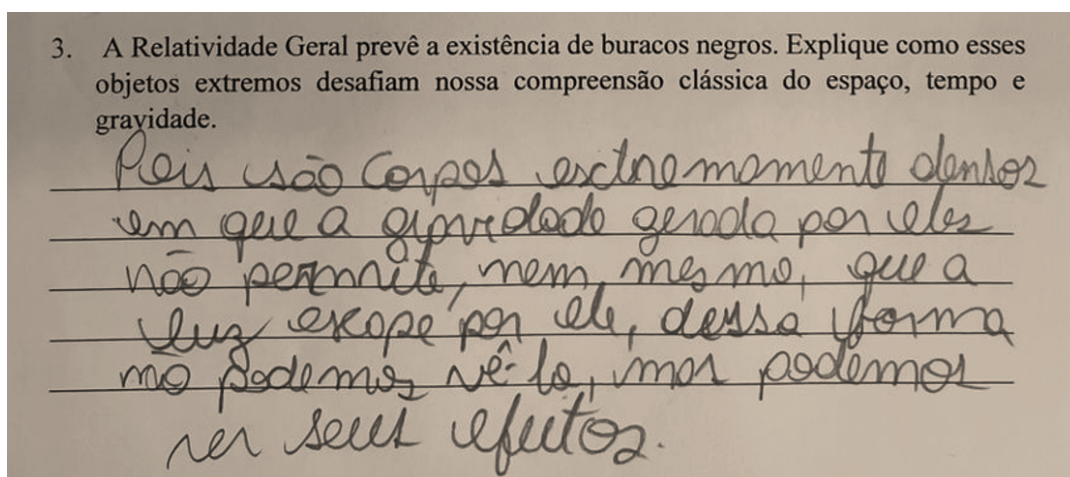
Figura 66. Resposta para questão 2 do módulo 3 (individuais 4).



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 67. Resposta para questão 3 do módulo 3 (individuais 4).



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Questionário em grupo 5. Relatividade Geral (aulas 9 e 10)

Esse questionário foi respondido no decorrer da aula, sendo proposto após uma apresentação do experimento do tecido e discussão do conteúdo. Um grupo com cinco estudantes participaram da atividade, com os resultados expostos na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10. Menções do questionário em grupo 5: Módulo 3 (aulas 9 e 10).

Questão	Grupo 1
1	4

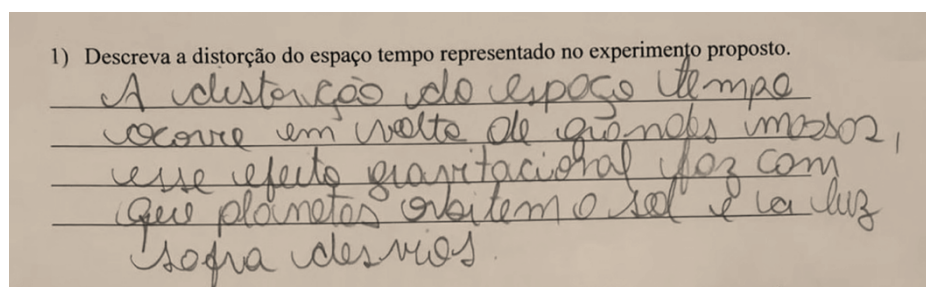
2	4
3	2

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os resultados obtidos demonstram um bom desempenho por parte dos estudantes com necessidade de ajustes em revisão do professor para seguir com a aplicação.

A seguir, são apresentados dos resultados de cada questão.

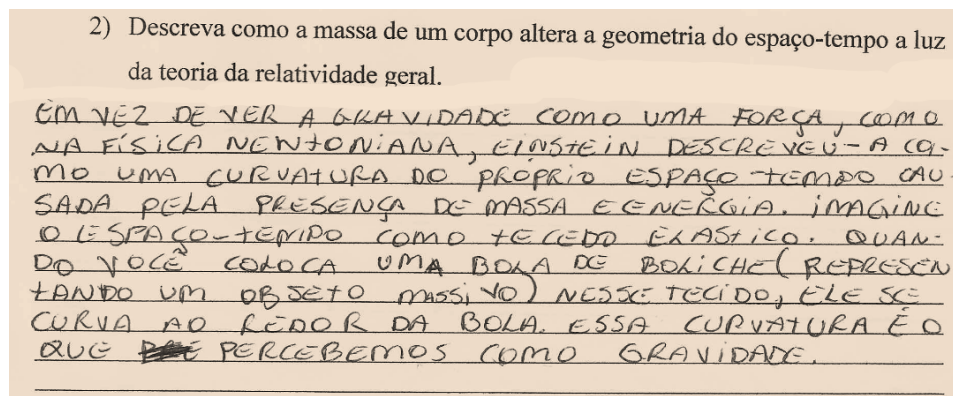
Figura 68. Resposta para questão 1 do quinto questionário.



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

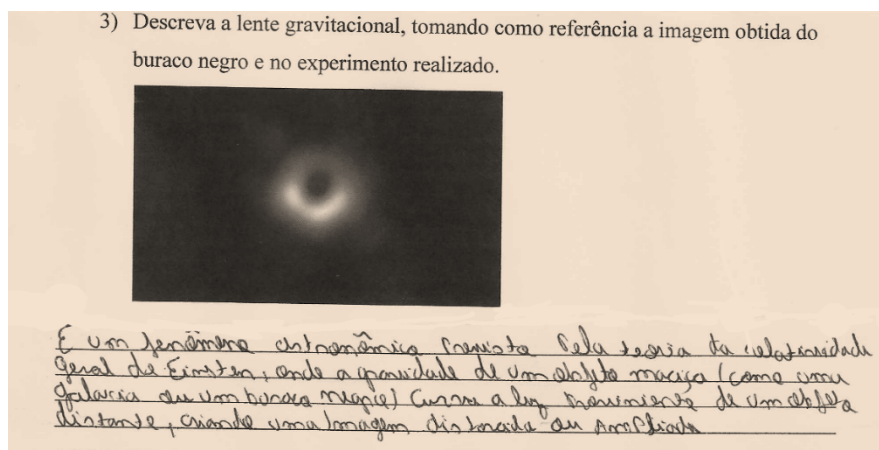
Figura 69. Resposta para questão 2 do quinto questionário.



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 70. Resposta para questão 3 do quinto questionário.



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Questões individuais 5 (aulas 9 e 10)

Esse questionário foi respondido individualmente por cinco estudantes presentes, na parte final da aula, sendo proposto após uma a apresentação, a realização do experimento do tecido e discussão do conteúdo. Os resultados são expostos na Tabela 11 a seguir:

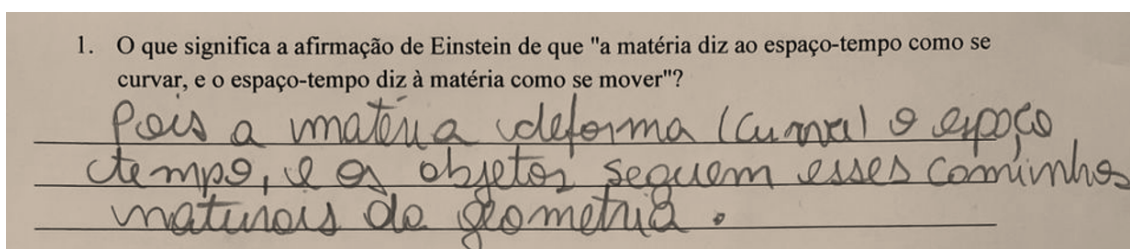
Tabela 11. Menções das questões individuais 5: Módulo 3 (aulas 9 e 10).

Questão	E1	E2	E3	E4
1	4	4	4	2
2	4	4	4	4
3	4	4	4	1
4	4	4	4	4

Fonte: Elaboração própria (2025).

As figuras a seguir ilustram exemplos das respostas dos estudantes para as questões:

Figura 71. Resposta individual para questão 1 do Módulo 3 (aulas 9 e 10).



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 72. Resposta individual para questão 2 do Módulo 3 (aulas 9 e 10).

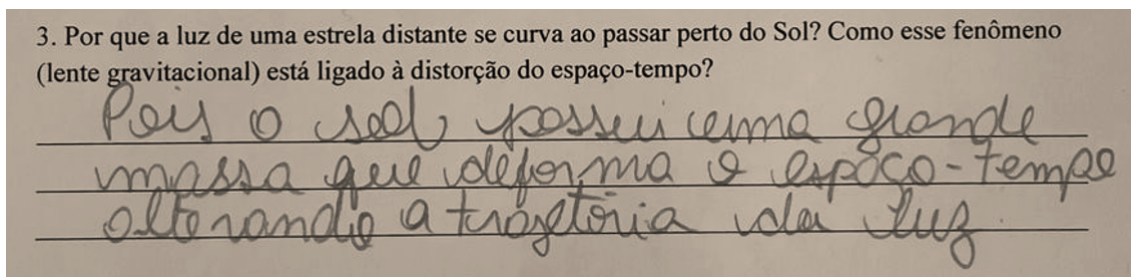
2. Como a distorção do espaço-tempo explica a órbita dos planetas ao redor do Sol, diferentemente da visão newtoniana da gravidade?

Os planetas seguem as deformações geradas pelo Sol em seu volta.

Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

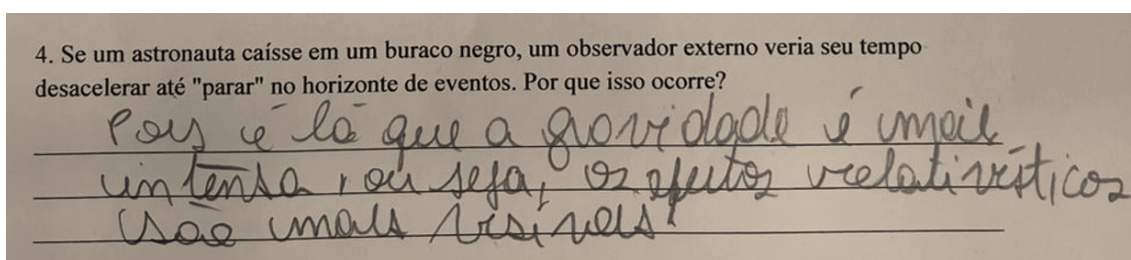
Figura 73. Resposta individual para questão 3 do Módulo 3 (aulas 9 e 10).



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

Figura 74. Resposta individual para questão 4 do Módulo 3 (aulas 9 e 10).



Fonte: Arquivo do autor (2025).

A resposta demonstra aprendizagem satisfatória sobre o tema abordado.

5.3. Resumo dos Dados

A Tabela 12 mostra as respostas individuais dos estudantes apresentadas nos 3 módulos aplicados. As respostas são classificadas pelos níveis de aprendizagem:

- 4: respostas que demonstram entendimento adequado do tema abordado.
- 3: respostas que demonstram entendimento intermediário do tema abordado.
- 2: respostas que demonstram entendimento precário do tema abordado.
- 1: respostas em desacordo com a matéria de ensino.

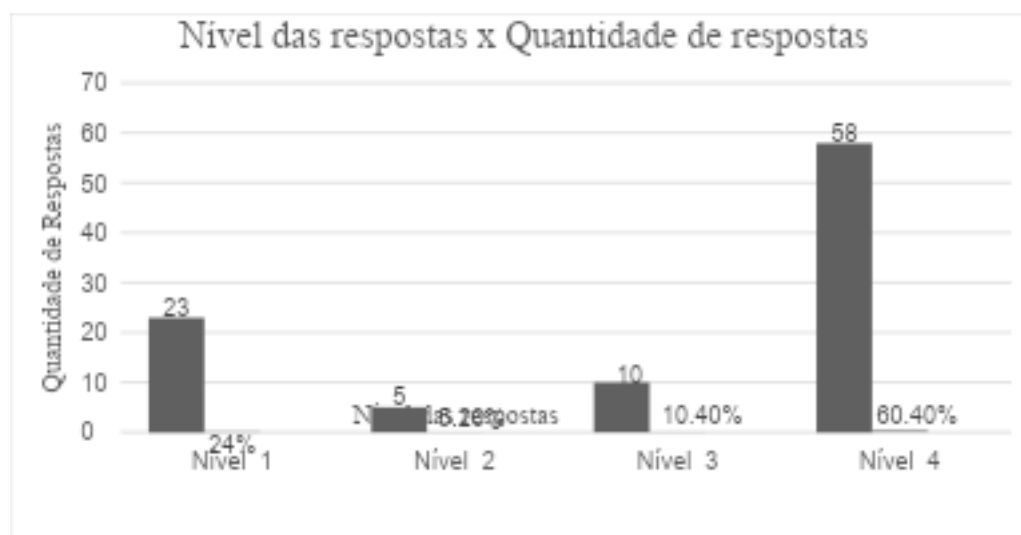
Tabela 12. Número de respostas avaliadas em cada nível para as respostas individuais de cada módulo.

MÓDULO	NÍVEL 1	NÍVEL 2	NÍVEL 3	NÍVEL 4
1 (32 RESPOSTAS)	10	0	4	18
2 (38 RESPOSTAS)	12	4	6	26
3 (16 RESPOSTAS)	1	1	0	14
TOTAL	23	5	10	58

Fonte: Elaboração própria (2025).

O Gráfico 1 mostra o número de questões avaliadas para cada nível. A partir desses dados é possível verificar que foram encontrados indícios de aprendizagem satisfatória em 70,80% das respostas avaliadas e de aprendizagem insatisfatória em 29,20% entre os estudantes frequentes. Os números demonstram que o produto educacional atendeu razoavelmente aos seus objetivos propostos.

Gráfico 1. Número de repostas avaliadas para cada nível.



Fonte: Elaboração própria (2025).

A baixa qualidade e quantidade de conhecimentos prévios certamente foram fatores preponderantes em relação aos resultados negativos obtidos. No fluxo de aprendizagem a informação lembrada sofre transformação por meio de uma nova informação e entra na memória de longa duração onde é armazenada para posterior rememoração (Gagné, 1980).

O conteúdo da aplicação dependia de conhecimentos prévios de mecânica e de ondulatória. Os estudantes que participaram da aplicação relataram jamais terem aulas de ondulatória.

O número de faltas dos estudantes às aulas também teve influência em relação à desmotivação e resultados já que os estudantes que perderam aplicações não conseguiram acompanhar as aulas e isso dificultou a aprendizagem pela perda da sequência lógica das etapas da aplicação.

Apesar de todos os contratempos, a aplicação demonstrou-se viável e bem-sucedida já que o primeiro contato dos estudantes com o conteúdo de Física Moderna e Contemporânea obteve muitas respostas positivas e gerou, certamente uma relevante mudança de comportamento, principalmente, para os estudantes que conseguiram frequentar todas as aulas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa dissertação propôs uma aplicação educacional com o intuito de incluir o ensino de Física Moderna e Contemporânea no ensino médio, da rede pública do Distrito Federal. O objetivo central foi a estruturação de uma sequência didática para o ensino da teoria da relatividade de Einstein no referencial teórico das Hierarquias da aprendizagem de Robert Gagné.

A presente sequência didática está embasada nos processos sequenciais da aprendizagem descritos no capítulo do referencial teórico onde foi elaborado o planejamento e entrega da instrução para o ensino da teoria da relatividade de Einstein. Ela é constituída de três módulos sequenciais e hierarquizados em que são tratados os seguintes subtemas: 1) Relatividade clássica de Galileu; 2) Relatividade Restrita; 3) Relatividade Geral.

Os módulos foram elaborados pelo professor/autor dessa dissertação que utilizou diversas estratégias e tecnologias educacionais (vídeos, demonstrações, experimentos, discussões em grupos, questionários e debates) voltadas à aprendizagem da teoria da relatividade pelos estudantes.

Essa sequência didática foi aplicada em uma turma do terceiro ano do ensino médio de uma escola pública do Distrito Federal, ao longo dos meses de outubro e novembro de 2024. Os estudantes demonstraram melhor interesse e comprometimento na aplicação da sequência didática do que ocorre normalmente nas aulas curriculares. Apesar disso, houve um número considerável de ausências, principalmente nos dois últimos encontros.

Os estudantes que frequentaram todas as aulas eram participativos nas discussões e interessados em aprender os conteúdos apresentados. Faziam perguntas sobre os assuntos estudados em todas as apresentações do professor de maneira que a partir desses questionamentos e participações dos estudantes nas discussões ficou demonstrado que a maior parte do conteúdo apresentado foi aprendido.

Com relação à aprendizagem, foram encontrados indícios de sua ocorrência quando da participação dos estudantes que frequentaram todas as aulas (por volta de 40%), visto que ficou registrado tanto nas discussões em grupo, quanto nas respostas dadas nos questionários aplicados. O grupo de estudantes que perdeu os dois últimos encontros (60% do total), a metade demonstrou indícios da aprendizagem parcial e a outra metade mostrou desinteresse no tema apresentando respostas desconexas, em presenças esporádicas nas aulas.

Conclui-se que os objetivos dessa dissertação foram alcançados. Isso porque a sequência didática foi construída com base numa teoria de aprendizagem sólida e tratou de temas de interesse dos estudantes e com potencial de estimular seus conhecimentos sobre assuntos absolutamente

negligenciados nas escolas do Distrito Federal. Para além desses resultados positivos, percebeu-se que a sequência didática poderia ser aprimorada com a adição de um módulo, que antecederia ao segundo. Tendo em vista a ausência de conhecimentos prévios sobre os fenômenos ondulatórios, por parte dos estudantes, necessários para o andamento da aplicação da sequência, verificada durante a aplicação do produto, a inserção de temas relativos à difração e interferência de ondas, poderia minimizar esses problemas.

Nesse contexto, como forma de continuar e melhorar o trabalho desenvolvido nessa dissertação, pretende-se produzir mais um módulo para a sequência didática relatada. Após, planeja-se realizar uma nova aplicação e avaliação do produto em turmas do terceiro ano do ensino médio. Essa nova aplicação tem a finalidade de verificar os possíveis ganhos em termos de aprendizagem do novo produto e fazer uma comparação com os resultados obtidos nas turmas do primeiro e terceiro anos do ensino médio. Cabe ressaltar que a continuidade da pesquisa, por meio da adição de um módulo extra, não influencia ou invalida os resultados gerais encontrados até o momento.

É possível concluir que, a inclusão de temas relativos à Física Moderna e Contemporânea, Introdução ao Estudo da Mecânica Quântica, entre outros no ensino médio, é completamente viável, desde que seja aplicado de forma rigorosamente planejada utilizando-se o referencial teórico de Hierarquias da aprendizagem. Com isso, o presente trabalho se direciona à atualização do currículo de física da educação básica e à reflexão sobre possíveis propostas didáticas correspondentes.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Lei 9.394, de 20 de dezembro de 1996. **Lei de diretrizes e bases da educação nacional**. Brasília: MEC, 1996.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular (BNCC)**. Brasília: MEC, 2018.
- CALCULADORA DE RELATIVIDADE. **Eter luminífero**. 2010. Disponível em: <https://medium.com/starts-with-a-bang/empty-space-has-more-energy-than-everything-in-the-universe-combined-1622b2f07427> Acesso em 01 set. 2024.
- COMCIÊNCIA. **Revista eletrônica de jornalismo**. 2019. Disponível em <https://www.comciencia.br/>. Acesso em: 25 ago. 2024.
- COVINGTON, M. V.; CRUTCHFIELD, R. S.; DAVIES, L.; OLTON, R. M. **Productive Thinking Program**. Berkeley: Educational Innovation Press, 1972.
- EHT. Astronomers Capture First Image of a Black Hole. **Event Horizon Telescope**, 2019. Disponível em: <https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole#>. Acesso em: 25 set. 2024.
- EINSTEIN, A. **A Teoria da Relatividade Especial e Geral**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.
- EINSTEIN, A.; GROSSMANN, M. Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation. **Zeitschrift für Mathematik und Physik**, v. 62, p. 225-261, 1913.
- ESHAM, B. D. **Michelson-Morley experiment**. 2007. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelson-Morley_experiment_\(en\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelson-Morley_experiment_(en).svg). Acesso em: 25 jul. 2025.
- EINSTEIN, A.; INFELD, L. **A Evolução da Física**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1988.
- EINSTEIN, A; **Die Feldgleichungen der Gravitation**. **Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften**, artigo original da TRG, 1915.
- FERREIRA, A. S. P. **Aprendizagem baseada em problemas no ensino de física: uma proposta para o ensino da relatividade**. 2022. 189 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação Profissional em Ensino de Física. PPGPEF). Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2022.
- FERREIRA, M.; COUTO, R. V. L.; SILVA FILHO, O. L.; MARINHO, L. P.; MONTEIRO, F. F. **Ensino de astronomia: uma abordagem didática a partir da Teoria da Relatividade Geral**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, p. 1-13, 2021.
- FERREIRA, M.; FILHO, O. L. S. Proposta de plano de aula para o ensino de Física. **Physicae Organum**, Brasília, v. 5, n. 1, p. 39-44, 2019.
- FERREIRA, M.; SILVA FILHO, O. L. Ensino de física: fundamentos, pesquisas e novas tendências. **Plurais: Revista Multidisciplinar da UNEB**, v. 6, n. 2, p. 9-19, 2021.
- FERREIRA, M.; SILVA FILHO, O. L.; MOREIRA, M. A.; FRANZ, G. B.; PORTUGAL, K. O.; NOGUEIRA, D. X. P. Unidade de Ensino Potencialmente Significativa sobre óptica geométrica apoiada por vídeos, aplicativos e jogos para smartphones. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, p. 1-13, 2020.

FERREIRA, M.; VIEIRA, T. F.; BATISTA, M. C.; SILVA FILHO, O. L. Proposta didática de Astronomia no Ensino Médio na epistemologia hierárquica de Gagné. **Revista de Produtos Educacionais e Pesquisas em Ensino (REPPE)**, v. 7, p. 27-53, 2023.

GAGNÉ, R. M. **Como se realiza a aprendizagem**. Rio de Janeiro: LTC, 1976.

GAGNÉ, R. M. **Princípios Essenciais da Aprendizagem para o Ensino**. Porto Alegre: Globo, 1980.

GALILEI, G. **Diálogo sobre os dois Máximos Sistemas do Mundo**. São Paulo: EDUSP, 2011.

HAWKING, S. **O universo numa casca de noz**. Ed. Intrínseca. 2016.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem Significativa**: a teoria e textos complementares. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011.

O FÍSICO. **Composição de movimentos**. 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=cNZazdGZPI0>. Acesso em: 25/08/2024.

OBSERVATÓRIO NACIONAL. **Placa Ecl0038**: Registro fotográfico do eclipse solar de 29 de maio de 1919 em Sobral, Ceará. Rio de Janeiro: Acervo da Biblioteca do Observatório Nacional, 1919. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hcsm/> Acesso em: 10 out. 2023.

PERRUCCI, T. **Como usar a escada rolante?** 2019. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=I_R0yiZDCmw. Acesso em: 25 ago. 2024.

RAMALHO, J.F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. **Os Fundamentos da Física**. São Paulo. Ed. Moderna. v. 1. 2010.

SOUSA, F. I. **A aprendizagem cooperativa no Ensino de Física: Um estudo de caso com professores de educação básica do Estado do Ceará**. 2020. 162f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática. PPGECEM). Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2022.

UNIVERSO RACIONALISTA. **Deformação do espaço-tempo**. 2017. Disponível em: <https://universoracionalista.org/principio-chave-de-einstein-sobrevive-a-teste-quantico/> Acesso em: 01 set. 2024.

WEBFISICA. **Relatividade Especial**. Webfísica 2020. Disponível em <https://webfisica.com>. Acesso em 25 ago. 2024.