

INSTITUTO E UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – IFAM/UFAM
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 04

**USO DE UM ANÁLOGO MECÂNICO DE BURACOS NEGROS ASSOCIADO A
METODOLOGIA *PEER INSTRUCTION* NO ENSINO DE CONCEITOS DE
RELATIVIDADE GERAL**

ELIABE RAFAEL FIGUEIRA CARDOSO

Manaus - AM
2026


ELIABE RAFAEL FIGUEIRA CARDOSO

**“USO DE UM ANÁLOGO MECÂNICO DE BURACOS NEGROS ASSOCIADO A
METODOLOGIA PEER INSTRUCTION NO ENSINO DE CONCEITOS DE
RELATIVIDADE GERAL”**


Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), polo 04 UFAM e IFAM como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. **Área de Concentração:** Ensino de Física. **Linha de Pesquisa:** Física no Ensino Médio.

Aprovada em 20 de março de 2026.





BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 JOSE ANGLADA RIVERA
Data: 20/03/2026 20:13:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. José Anglada Rivera – Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM

Documento assinado digitalmente
 MARCIO ANDREI SOUSA AMAZONAS
Data: 24/03/2026 16:37:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Marcio Andrei Souza Amazonas – Membro Titular Interno
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM

Alysson  Assinado digitalmente por
Brhian de  Alysson Brhian de
Souza Muniz  Souza Muniz Silva
Silva  Data: 2026.03.21
13:28:58-04'00'

Dr. Alysson Brhian de Souza Muniz Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM

Biblioteca do IFAM – Campus Manaus Centro

C268u Cardoso, Eliabe Rafael Figueira.

Uso de um análogo mecânico de buracos negros associado a metodologia Peer Instruction no ensino de conceitos de relatividade geral / Eliabe Rafael Figueira Cardoso. – Manaus, 2026.

165 p. : il. color.

Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física). – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus Centro; Universidade Federal do Amazonas, 2026.

Orientador: Prof. Dr. José Anglada Rivera.

1. Análogo mecânico. 2. Buracos Negros. 3. Peer Instruction. 4. Relatividade geral. I. Rivera, José Anglada. (Orient.) II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Universidade Federal do Amazonas. IV. Título.

CDD 530.11

Agradecimentos

A Deus, em quem creio de forma genuína, agradeço por me conceder forças, discernimento e perseverança ao longo de toda essa caminhada. Nos momentos de incerteza, cansaço e dificuldades, foi na fé que encontrei sustento para continuar, renovar as esperanças e seguir adiante. Reconheço que cada etapa vencida deste percurso só foi possível graças à graça e ao cuidado de Deus em minha vida.

Aos meus pais, Benedita Figueira e José Ribamar, registro minha mais profunda gratidão. À minha mãe, Benedita Figueira, agradeço pelo apoio incondicional, pelo incentivo constante e pelo suporte oferecido ao longo de todo o curso, sempre acreditando na importância da minha formação e nos meus sonhos. Ao meu pai, José Ribamar, que infelizmente faleceu no início deste ano, deixo aqui uma homenagem especial e cheia de saudade. Seu maior sonho era me ver alcançar o título de mestre, e este trabalho é, também, uma forma de honrar sua memória, seu esforço e tudo o que ele representou na minha vida. Ao meu irmão Samuel, agradeço pelo companheirismo, pelo incentivo contínuo e, especialmente, pela ajuda nas revisões gramaticais deste trabalho.

Ao meu orientador, professor José Anglada, expresso minha sincera gratidão pelas orientações claras, objetivas e sempre precisas, bem como pela confiança depositada em mim ao conceder autonomia para o desenvolvimento da pesquisa. Sua postura como orientador contribuiu não apenas para a qualidade deste trabalho, mas também para meu crescimento acadêmico e profissional ao longo do mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001. Agradeço à CAPES, instituição fundamental para o fortalecimento da pós-graduação e da pesquisa científica no Brasil, a qual desempenha um papel decisivo na formação de pesquisadores.

Por fim, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM, pelo apoio financeiro que possibilitou a realização desta pesquisa.

RESUMO

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento, a validação e a implementação de um produto educacional consistente em um análogo mecânico representativo de buracos negros, articulado à metodologia ativa *Peer Instruction* (PI), com o objetivo de investigar suas contribuições para o ensino de conceitos introdutórios da Relatividade Geral no Ensino Médio. A proposta fundamenta-se na compreensão da gravitação como curvatura do espaço-tempo e busca estabelecer relações conceituais entre a Física Clássica e a Física Moderna, de modo a favorecer a aprendizagem significativa de conteúdos abstratos e epistemologicamente desafiadores. A pesquisa caracteriza-se como um estudo aplicado, de natureza quali-quantitativa, desenvolvido com duas turmas da terceira série do Ensino Médio, totalizando 40 alunos. A intervenção pedagógica foi estruturada em uma sequência didática composta por seis aulas, nas quais o análogo mecânico foi utilizado como recurso mediador, associado à aplicação sistemática do *Peer Instruction*. A coleta de dados envolveu a aplicação de questionários pré e pós-intervenção em escala Likert, testes conceituais com questões objetivas e dissertativas, analisados por meio do ganho normalizado de Hake, além da utilização de diários de bordo padronizados para os estudantes preencherem ao longo das aulas. Os resultados indicam ganhos conceituais relevantes para parte significativa dos estudantes, bem como mudanças positivas nas percepções relacionadas ao interesse, à participação ativa e à compreensão dos conceitos abordados. A análise integrada dos instrumentos evidencia a convergência entre aprendizagem medida e aprendizagem percebida, além de destacar o papel das interações entre pares e do uso crítico de analogias no processo de construção conceitual. Conclui-se que a articulação entre análogos físicos e metodologias ativas constitui uma estratégia pedagógica promissora para a introdução de temas da Física Moderna no Ensino Médio, desde que acompanhada de mediação docente intencional e fundamentação teórica consistente. O estudo contribui para o campo do Ensino de Física ao oferecer um produto educacional, materializado em um Guia Didático, validado e ao ampliar as discussões sobre possibilidades didáticas para o ensino de Relatividade Geral em contextos escolares, apontando, ainda, perspectivas para investigações futuras.

Palavras-chave: Análogo mecânico, Buracos Negros, Peer Instruction, Relatividade Geral.

ABSTRACT

This dissertation presents the development, validation, and implementation of an educational product consisting of a mechanical analogue representing black holes, articulated with the active methodology Peer Instruction (PI), with the aim of investigating its contributions to the teaching of introductory concepts of General Relativity in High School. The proposal is based on the understanding of gravitation as the curvature of spacetime and seeks to establish conceptual relationships between Classical Physics and Modern Physics, in order to favor the meaningful learning of abstract and epistemologically challenging content. The research is characterized as an applied study, of a qualitative-quantitative nature, developed with two classes of the third year of High School, totaling 40 students. The pedagogical intervention was structured in a didactic sequence composed of six classes, in which the mechanical analogue was used as a mediating resource, associated with the systematic application of Peer Instruction. Data collection involved the application of pre- and post-intervention questionnaires using a Likert scale, conceptual tests with objective and open-ended questions, analyzed using Hake's normalized gain, and the use of standardized logbooks for students to complete throughout the classes. The results indicate relevant conceptual gains for a significant portion of the students, as well as positive changes in perceptions related to interest, active participation, and understanding of the concepts covered. The integrated analysis of the instruments highlights the convergence between measured and perceived learning, in addition to emphasizing the role of peer interactions and the critical use of analogies in the conceptual construction process. It is concluded that the articulation between physical analogies and active methodologies constitutes a promising pedagogical strategy for the introduction of Modern Physics topics in High School, provided it is accompanied by intentional teacher mediation and consistent theoretical grounding. This study contributes to the field of Physics Education by offering an educational product, embodied in a validated Teaching Guide, and by expanding discussions on didactic possibilities for teaching General Relativity in school contexts, while also pointing to perspectives for future research.

Keywords: Black holes, General relativity, Mechanical analogue, Peer instruction.

Lista de Figuras

Figura 1: Superfície esférica σ de raio R.	14
Figura 3: Convergência Hake-Freeman	28
Figura 4: Fluxograma das etapas do PI	31
Figura 5: Concepção acerca do uso de análogos	36
Figura 6: Análogo mecânico	38
Figura 7: Uso do app Plickers na sala para coletar as respostas dos alunos	50
Figura 8: Momento Discussão em pares	51
Figura 9: Relatório das Concepts Questions no Plickers	52
Figura 10: Uso do análogo para explicação	52
Figura 11: Questões dissertativas no pré-teste	61
Figura 12: Questões dissertativas no pré-teste	61
Figura 13: Questões dissertativas no pós-teste	62
Figura 14: Questões dissertativas no pós-teste	63
Figura 15: Momento em que os alunos faziam registros no Diário de Bordo	74
Figura 16: Anotações do aluno A no diário de bordo.	75
Figura 17: Anotações do aluno B no diário de bordo.	75

Lista de Tabelas e Gráficos

Tabela 1: Média das notas no Pré e Pós-Teste	58
Gráfico 1: Rendimento dos alunos	64
Gráfico 2: Quantidade de alunos em cada intervalo	65
Gráfico 3: Análise do Pré Questionário	68
Gráfico 4: Análise Pós Questionário	71

Lista de Siglas e Abreviaturas

BNCC	Base Nacional Comum Curricular
EHT	Event Horizon Telescope
GPS	Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)
PI	Peer Instruction
SAEB	Sistema de Avaliação da Educação Básica
STEM	Science, Technology, Engineering and Mathematics

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 Fundamentos da Teoria da Relatividade Geral.....	14
2.2 Princípio da Equivalência e Princípio da Covariância Geral.....	21
2.3 O ensino de Física no Ensino Médio e os desafios da aprendizagem conceitual.....	25
2.4 Metodologias ativas no ensino de Física.....	27
2.5 O método Peer Instruction.....	29
2.6 O ensino de Física Moderna no Ensino Médio.....	32
2.7 O uso de análogos no ensino de Física.....	34
2.7.1 Proposta de Análogo: Concepção, Construção e Potencial Didático.....	37
3 METODOLOGIA.....	39
3.1 Natureza e abordagem da pesquisa.....	39
3.2 Contexto da pesquisa e caracterização da escola.....	41
3.3 Caracterização dos participantes da pesquisa.....	42
3.4 Descrição do Produto Educacional.....	43
3.5 Comitê Ad Hoc.....	45
3.6 Sequência didática aplicada.....	46
3.7 Implementação do método Peer Instruction e uso do aplicativo Plickers.....	48
3.8 Instrumentos de coleta de dados.....	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1 Caracterização geral dos dados coletados.....	55
4.2 Resultados do teste conceitual.....	57
4.3 Análise do ganho normalizado de Hake.....	64
4.4 Resultados dos questionários pré e pós-intervenção.....	67
4.4.1 Pré-intervenção.....	67
4.4.2 Pós-intervenção.....	71
4.5 Análise dos diários de bordo dos estudantes.....	73
4.6 Discussão integrada dos resultados da intervenção pedagógica.....	76
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

1 INTRODUÇÃO

O ensino de Física no Ensino Médio brasileiro enfrenta desafios persistentes relacionados à aprendizagem conceitual, ao engajamento dos estudantes e à percepção da disciplina como excessivamente abstrata e dissociada da realidade cotidiana. Estudos na área de ensino de Ciências indicam que práticas pedagógicas tradicionalmente centradas na exposição verbal e na resolução mecânica de exercícios matemáticos tendem a privilegiar procedimentos algorítmicos em detrimento da compreensão conceitual, reforçando a visão da Física como uma “segunda matemática” (Diniz, 2015; Studart, 2019). Esse cenário contribui para dificuldades de aprendizagem mesmo em conteúdos clássicos, agravando-se quando são introduzidos temas da Física Moderna e Contemporânea.

No contexto da educação básica, particularmente no Ensino Médio, conteúdos associados à Física Moderna, como a Teoria da Relatividade Geral e os buracos negros, ainda são pouco explorados de forma sistemática. Quando abordados, esses temas frequentemente aparecem de maneira superficial, descontextualizada ou apenas como curiosidades científicas, o que limita sua função formativa (Marques; Soltau, 2022). Entretanto, a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) reconhece a importância da compreensão da dinâmica da Terra e do Cosmos, ao estabelecer, no eixo de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, competências e habilidades relacionadas à análise de fenômenos gravitacionais e cosmológicos, especialmente no terceiro ano do Ensino Médio (Brasil, 2017).

Dentre os conteúdos está a Teoria da Relatividade Geral, formulada por Albert Einstein no início do século XX. Essa teoria revolucionou o entendimento da gravidade ao interpretá-la não mais como uma força, mas como uma manifestação da curvatura do espaço-tempo causada pela presença de massa e energia (Einstein, 1916). Embora o formalismo matemático dessa teoria seja incompatível com o nível da educação básica, seus fundamentos conceituais podem ser explorados de maneira qualitativa por meio de modelos, analogias e estratégias didáticas adequadas (Ferreira et al., 2021). Nesse sentido, os buracos negros constituem um objeto de estudo particularmente fértil, pois concentram, de forma extrema, efeitos relativísticos como a curvatura intensa do espaço-tempo, a dilatação do tempo gravitacional e a existência do horizonte de eventos (Hawking, 1988).

A utilização de modelos e análogos físicos no ensino de Física tem sido amplamente discutida na literatura como uma estratégia relevante para a mediação

de conceitos abstratos, desde que suas potencialidades e limitações sejam explicitadas (Tavares, Boas & Oliveira, 1993; Morais, 2022). Análogos mecânicos permitem estabelecer correspondências parciais entre sistemas familiares aos estudantes e fenômenos complexos da Física Moderna, favorecendo a visualização e a discussão conceitual. Contudo, o uso acrítico de analogias pode reforçar concepções alternativas ou interpretações equivocadas, tornando imprescindível a mediação docente e a problematização explícita dos limites do modelo adotado, como argumenta Freire (2015).

Nesse contexto, as metodologias ativas de aprendizagem têm ganhado destaque por deslocarem o foco do ensino da transmissão de conteúdos para a participação ativa dos estudantes na construção do conhecimento. Uma dessas metodologias é o Peer Instruction (PI), desenvolvido por Mazur (1997), que visa promover a aprendizagem conceitual por meio da discussão entre pares a partir de questões cuidadosamente elaboradas. Pesquisas indicam que essa abordagem favorece a explicitação de concepções prévias, o confronto de ideias e o desenvolvimento da argumentação científica, elementos fundamentais para a aprendizagem significativa em Física (Araújo et al., 2017; Ramalho, 2019., Costa, 2021). Apesar de sua eficácia demonstrada em diferentes contextos, a aplicação do Peer Instruction no ensino médio brasileiro, especialmente em conteúdos de Física Moderna, ainda carece de investigações empíricas sistemáticas.

A realidade educacional de escolas públicas localizadas em contextos socioeconômicos vulneráveis, como bairros periféricos da cidade de Manaus, impõe desafios adicionais ao ensino de Física. Dados provenientes de avaliações externas, como o Sistema de Avaliação da Educação Básica (SAEB), evidenciam baixos índices de aprendizagem e dificuldades persistentes na compreensão de conceitos científicos fundamentais (SAEB, 2023). Tais condições tornam ainda mais complexa a introdução de temas avançados, exigindo estratégias didáticas que considerem o contexto escolar, os conhecimentos prévios dos alunos e a necessidade de promover engajamento ativo em sala de aula.

Diante desse cenário, esta pesquisa investigou a contribuição de um análogo mecânico de buracos negros, articulado à metodologia Peer Instruction, para a compreensão de conceitos básicos da Teoria da Relatividade Geral por alunos do terceiro ano do Ensino Médio. O estudo analisou em que medida essa combinação didática favoreceu a aprendizagem conceitual, o engajamento discente e a

participação nas discussões em sala de aula, bem como identificou as limitações do análogo enquanto recurso pedagógico.

A questão central que orientou a pesquisa problematiza de que maneira o uso de um análogo mecânico de buracos negros, mediado pela metodologia Peer Instruction, contribui para a compreensão conceitual de noções básicas da Relatividade Geral no Ensino Médio. A partir dessa pergunta, investigou-se também a percepção dos estudantes sobre a metodologia utilizada, os avanços conceituais observados após a intervenção pedagógica e as principais dificuldades enfrentadas durante o processo de aprendizagem.

O objetivo geral deste trabalho consistiu em avaliar o impacto do uso de um análogo mecânico de buracos negros, associado à metodologia Peer Instruction, na aprendizagem de conceitos básicos de Relatividade Geral. Como objetivos específicos, tem-se o desenvolvimento de um análogo mecânico representativo de propriedades fundamentais dos buracos negros; a elaboração e implementação de um guia didático para aplicação da metodologia; a análise da evolução conceitual dos estudantes por meio de testes diagnósticos e avaliações posteriores; a investigação do nível de engajamento discente durante as atividades propostas e o mapeamento das principais dificuldades conceituais apresentadas pelos alunos.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta o referencial teórico, abordando as metodologias ativas, o método Peer Instruction, o ensino de Física Moderna no Ensino Médio e o uso de análogos no ensino de Física. O Capítulo 3 descreve os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, detalhando o contexto, os participantes, o produto educacional e os instrumentos de coleta e análise de dados. No Capítulo 4, discute-se os resultados obtidos a partir da intervenção pedagógica, analisando-os à luz da literatura especializada. Por fim, no Capítulo 5, apresenta-se as considerações finais, destacando as contribuições, limitações e possibilidades de desdobramentos futuros da pesquisa.

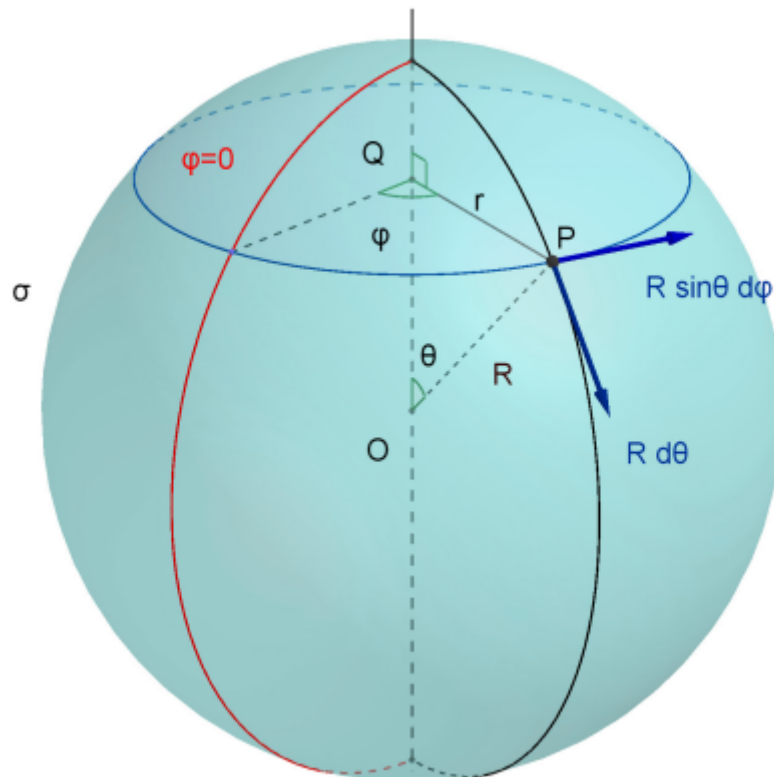
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fundamentos da Teoria da Relatividade Geral

A Teoria da Relatividade Geral, proposta por Albert Einstein em 1915, descreve a gravitação como um efeito geométrico associado à curvatura do espaço-tempo, abandonando a noção newtoniana de força gravitacional (Einstein, 1916). Nessa formulação, o espaço-tempo é modelado como uma variedade diferenciável quadridimensional dotada de uma métrica pseudo-riemanniana $g_{\mu\nu}$, responsável por definir as propriedades geométricas do contínuo espaço-temporal (Garms et al., 2024).

“No espaço euclidiano a distância infinitesimal é obtida, a partir do teorema de Pitágoras, pela relação $ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2}$. Rearranjando os termos desta equação, podemos escrever $ds^2 = (dx)^2 + (dy)^2$ ” (Garms et al., 2024).

Figura 1: Superfície esférica σ de raio R.



Fonte: (Garms et al., 2024)

O elemento de distância ds^2 , denominado métrica, descreve a estrutura geométrica do espaço euclidiano. Esse conceito de métrica estende-se a espaços mais gerais, incluindo o espaço-tempo da Relatividade Geral, no qual a métrica

passa a codificar as propriedades geométricas associadas à presença de matéria e energia (Garms et al., 2024).

No âmbito da Relatividade Restrita, o espaço-tempo quadridimensional na ausência de fontes gravitacionais é descrito pela métrica de Minkowski, que define o intervalo espaço-temporal invariante entre dois eventos por meio da expressão

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \quad 2.1.1$$

ds^2 → Intervalo espaço-temporal invariante

c → Velocidade da luz no vácuo

dt → Intervalo de tempo

dr → Variação radial (distância)

r → Coordenada radial (distância ao centro)

$d\theta$ → Variação do ângulo polar (colatitude)

θ → Ângulo polar

$d\phi$ → Variação do ângulo azimutal

ϕ → Ângulo azimutal

$\sin^2 \theta$ → Fator geométrico da esfera

Essa equação descreve o espaço-tempo plano da Relatividade Restrita, mas já escrita em coordenadas esféricas, o que muitas vezes é negligenciado por quem associa Minkowski apenas a coordenadas cartesianas. O intervalo ds^2 constitui uma grandeza geométrica fundamental, independente do sistema de coordenadas, e fornece a base para a descrição relativística do espaço-tempo em regiões onde os efeitos gravitacionais podem ser desprezados.

A Teoria da Relatividade Geral estende esse formalismo ao considerar que a presença de massa e energia modifica a geometria do espaço-tempo. Matematicamente, essa modificação é incorporada por meio de uma métrica geral $g_{\mu\nu}$, de modo que o intervalo espaço-temporal passa a ser escrito, em notação tensorial, como

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad 2.1.2$$

ds^2 → Intervalo espaço-temporal

$g_{\mu\nu}$ → Tensor métrico (define a geometria do espaço-tempo)

dx^μ → Diferencial da coordenada μ

dx^ν → Diferencial da coordenada ν

μ, ν → Índices que variam de 0 a 3 (tempo + 3 dimensões espaciais)

Aqui está o salto conceitual central da Relatividade Geral: o espaço-tempo deixa de ser fixo e passa a ser dinâmico e dependente da matéria e energia. O tensor métrico $g_{\mu\nu}$ contém toda a informação sobre geometria, distâncias, ângulos, trajetórias e até o comportamento do tempo. Diferente da equação anterior, agora o intervalo ds^2 depende do ponto do espaço-tempo, porque o próprio tecido do universo pode estar curvado. Esta equação descreve a geometria, mas quem determina o $g_{\mu\nu}$ são as equações de Einstein. Ou seja, essa expressão é estrutural, não dinâmica. A física entra quando você conecta essa geometria com a distribuição de massa-energia.

Em situações de simetria esférica, como no caso de uma massa pontual ou de uma distribuição de massa esfericamente simétrica e não rotante, o espaço-tempo externo pode ser descrito pela chamada métrica de Schwarzschild. Nessa situação, os coeficientes métricos dependem apenas da coordenada radial r , e o elemento de linha pode ser expresso na forma geral

$$ds^2 = g_{tt}(r) c^2 dt^2 - g_{rr}(r) dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta d\phi^2 \quad 2.1.3$$

ds^2 → Intervalo espaço-temporal invariante

$g_{tt}(r)$ → Componente temporal da métrica (relacionada à dilatação do tempo)

$g_{rr}(r)$ → Componente radial da métrica (relacionada à deformação espacial radial)

r → Coordenada radial (distância ao centro da massa)

c → Velocidade da luz no vácuo

dt → Intervalo de tempo

dr → Variação radial

$d\theta$ → Variação do ângulo polar

$d\phi$ → Variação do ângulo azimutal

$\sin^2\theta$ → Fator geométrico da esfera

Esta equação é a forma mais geral possível para um espaço-tempo estático e esfericamente simétrico. Os coeficientes $g_{tt}(r)$ e $g_{rr}(r)$ dependem de r , ou seja, a geometria muda com a distância da massa, isso codifica diretamente os efeitos gravitacionais. Outro ponto conceitual forte: enquanto o termo angular permanece igual ao de Minkowski, a gravidade aparece justamente nos termos radial e temporal, indicando que tempo e espaço radial são deformados de maneira diferente, o que leva a efeitos como dilatação do tempo gravitacional e alongamento radial.

Os termos associados às coordenadas angulares mantêm a mesma forma da métrica de Minkowski, enquanto os coeficientes $g_{tt}(r)$ e $g_{rr}(r)$ codificam os efeitos gravitacionais produzidos pela massa central. No limite em que a massa tende a zero, espera-se que o espaço-tempo recupere a forma plana, o que implica

$$g_{tt}(r) \rightarrow 1, \quad g_{rr}(r) \rightarrow 1 \quad 2.1.4$$

Essa condição funciona como um teste de consistência física: qualquer solução válida da Relatividade Geral deve recuperar a Relatividade Restrita quando a gravidade desaparece (ou seja, quando a massa tende a zero ou quando estamos muito longe da fonte). Isso não é apenas um detalhe matemático, é um princípio físico profundo chamado limite clássico. Podemos assumir implicitamente que esse limite sempre ocorre de forma trivial, mas nem toda solução das equações de Einstein satisfaz isso automaticamente. É justamente essa condição que seleciona soluções fisicamente aceitáveis, como a de Schwarzschild.

Para a análise de trajetórias confinadas ao plano equatorial, definido por $\theta = \frac{\pi}{2}$, a parte espacial da métrica reduz-se a uma forma bidimensional

circularmente simétrica, dada por

$$ds^2 = g_{rr}(r) dr^2 + r^2 d\phi^2 \quad 2.1.5$$

A solução exata das equações de campo de Einstein para esse problema conduz à forma explícita da métrica de Schwarzschild, que pode ser escrita como

$$ds^2 = c^2 dt^2 \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) - \frac{dr^2}{1 - \frac{r_s}{r}} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \quad 2.1.6$$

$ds^2 \rightarrow$ Intervalo espaço-temporal invariante

$c \rightarrow$ Velocidade da luz no vácuo

$dt \rightarrow$ Intervalo de tempo coordenado

$r \rightarrow$ Coordenada radial

$r_s \rightarrow$ Raio de Schwarzschild

$\frac{r_s}{r} \rightarrow$ Parâmetro adimensional que mede a intensidade do campo gravitacional

$dr \rightarrow$ Variação radial

$d\theta \rightarrow$ Variação do ângulo polar

$d\phi \rightarrow$ Variação do ângulo azimutal

$\sin^2 \theta \rightarrow$ Fator geométrico da esfera

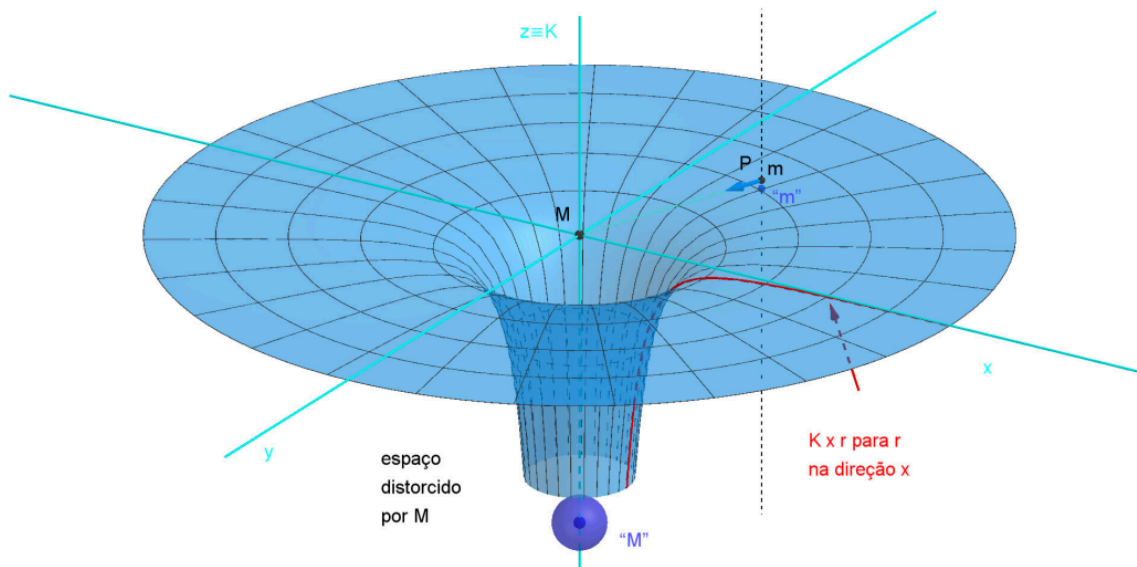
em que o parâmetro

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \quad 2.1.7$$

é denominado raio de Schwarzschild da massa M .

Essa é a solução exata das equações de Einstein para uma massa esférica, estática e não rotante. O fator $1 - \frac{r_s}{r}$ mostra como o tempo e o espaço são deformados pela presença da massa como representado na Figura 2.

Figura 2: Visualização da curvatura do espaço ao redor da massa M.



Fonte: (Garms et al., 2024)

Nessa métrica, o coeficiente temporal $g_{tt}(r) = 1 - \frac{r_s}{r}$ está diretamente associado aos efeitos de dilatação gravitacional do tempo, enquanto o coeficiente radial $g_{rr}(r) = (1 - \frac{r_s}{r})^{-1}$ expressa a distorção geométrica do espaço na direção radial. Esses termos evidenciam que, na Relatividade Geral, a gravitação não é interpretada como uma força no sentido newtoniano, mas como uma manifestação da curvatura do espaço-tempo.

Conseqüentemente, o movimento de partículas e de radiação não é descrito por equações de força, mas por geodésicas da geometria definida pela métrica. Esse formalismo geométrico constitui a base teórica para a descrição relativística de campos gravitacionais intensos e, em particular, para o estudo de objetos compactos como estrelas de nêutrons e buracos negros.

O intervalo espaço-temporal invariante entre dois eventos infinitesimalmente próximos é dado pela equação (2.2) em que (ds) representa o intervalo próprio, (dx^μ) são as diferenciais das coordenadas espaço-temporais e os índices (μ, ν) variam de 0 a 3, sendo o índice temporal associado à coordenada (ct) (Misner, Thorne & Wheeler, 1973).

A relação fundamental entre a geometria do espaço-tempo e a distribuição de

matéria e energia é expressa pelas equações de campo de Einstein, escritas como:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad 2.1.8$$

onde ($G_{\mu\nu}$) é o tensor de Einstein, que descreve a curvatura do espaço-tempo, ($T_{\mu\nu}$) é o tensor energia-momento, (G) é a constante gravitacional universal e (c) é a velocidade da luz no vácuo (Einstein, 1916). Essas equações sintetizam o princípio segundo o qual a matéria e a energia determinam a curvatura do espaço-tempo, e essa curvatura governa o movimento da matéria.

Um dos efeitos físicos mais relevantes previstos pela Relatividade Geral é a dilatação gravitacional do tempo. Em um campo gravitacional estático e fraco, o intervalo de tempo medido por um relógio situado a uma distância radial (r) de uma massa (M) relaciona-se ao intervalo de tempo medido por um observador distante por meio da expressão:

$$\Delta t = \Delta t_0 \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}} \quad 2.1.9$$

em que (Δt_0) corresponde ao tempo próprio medido por um observador em potencial gravitacional desprezível (Hartle, 2003). Esse efeito foi experimentalmente confirmado e possui aplicações tecnológicas diretas, como no funcionamento do sistema de posicionamento global (GPS), que requer correções relativísticas para garantir precisão (Ashby, 2003).

Uma das soluções exatas mais importantes das equações de campo de Einstein é a métrica de Schwarzschild (eq. 2.6), que descreve o espaço-tempo externo a uma distribuição de massa esfericamente simétrica, não carregada e não rotante (Schwarzschild, 1916). Para valores de ($r < r_s$), nenhuma informação causal pode alcançar observadores externos, caracterizando uma região do espaço-tempo causalmente desconectada.

À medida que um observador se aproxima do horizonte de eventos, a dilatação gravitacional do tempo torna-se extrema. Do ponto de vista de um observador distante, o tempo próprio associado a um relógio em queda livre próximo ao horizonte tende assintoticamente a zero, ilustrando a ruptura definitiva da Relatividade Geral com a noção clássica de tempo absoluto (Hartle, 2003).

Os buracos negros, longe de serem meras soluções matemáticas, possuem forte respaldo observacional. Evidências empíricas incluem a detecção direta de ondas gravitacionais provenientes da fusão de buracos negros (Abbott et al., 2016) e a obtenção de imagens do horizonte de eventos por meio do Event Horizon Telescope (EHT Collaboration, 2019), confirmando previsões fundamentais da Relatividade Geral em regimes extremos de campo gravitacional.

2.2 Princípio da Equivalência e Princípio da Covariância Geral

A formulação da Teoria da Relatividade Geral fundamenta-se em dois pilares conceituais e matemáticos essenciais: o Princípio da Equivalência e o Princípio da Covariância Geral. Esses princípios não apenas orientam a construção formal da teoria, como também impõem restrições físicas e geométricas profundas sobre a forma das leis da gravitação, diferenciando a Relatividade Geral de teorias gravitacionais alternativas (Einstein, 1916; Will, 2014).

O Princípio da Equivalência, em sua forma mais elementar, afirma a equivalência entre os efeitos de um campo gravitacional uniforme e os efeitos de um sistema de referência acelerado. Essa ideia tem origem empírica na observação de que a massa gravitacional e a massa inercial são numericamente indistinguíveis, implicando que todos os corpos em queda livre experimentam a mesma aceleração independentemente de sua composição ou estrutura interna. Matematicamente, essa equivalência manifesta-se no fato de que a aceleração gravitacional pode ser localmente eliminada por uma transformação apropriada de coordenadas.

Considerando um referencial não inercial acelerado com aceleração constante (\vec{a}), o movimento de uma partícula de massa (m) é descrito pela equação:

$$m \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = - m \vec{a} \quad 2.2.1$$

m → Massa da partícula

\vec{x} → Vetor posição da partícula

$\frac{d^2 \vec{x}}{dt^2}$ → Aceleração da partícula

t → Tempo

\vec{a} → Aceleração do referencial (não inercial)

que é formalmente idêntica à equação do movimento de uma partícula em um campo gravitacional uniforme (\vec{g}), quando se identifica ($\vec{g} = \vec{a}$). Essa equivalência local conduz à conclusão de que, em uma região suficientemente pequena do espaço-tempo, é sempre possível escolher um sistema de coordenadas no qual os efeitos gravitacionais desaparecem, caracterizando um referencial localmente inercial (Hartle, 2003).

Na linguagem matemática da Relatividade Geral, o Princípio da Equivalência é formalizado pela possibilidade de anular localmente os símbolos de Christoffel ($\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}$) em um ponto específico do espaço-tempo por meio de uma escolha adequada de coordenadas:

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}(p) = 0 \quad 2.2.2$$

onde (p) denota um ponto arbitrário da variedade espaço-temporal. Essa propriedade evidencia que a conexão gravitacional não representa uma força no sentido clássico, mas sim um efeito geométrico associado à curvatura do espaço-tempo. Importa ressaltar que, embora os símbolos de Christoffel possam ser anulados localmente, as quantidades geométricas associadas à curvatura, como o tensor de Riemann, permanecem invariantes, refletindo a presença real do campo gravitacional (Misner, Thorne & Wheeler, 1973).

A consequência direta do Princípio da Equivalência é a universalidade da queda livre, expressa pelas equações geodésicas. O movimento de uma partícula livre no espaço-tempo curvo é descrito por:

$$\frac{d^2 x^{\lambda}}{d\tau^2} + \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} \frac{dx^{\mu}}{d\tau} \frac{dx^{\nu}}{d\tau} = 0 \quad 2.2.3$$

$x^{\lambda} \rightarrow$ Coordenada espaço-temporal (componente λ)

$\frac{d^2 x^{\lambda}}{d\tau^2} \rightarrow$ Aceleração da partícula no espaço-tempo (em termos do tempo próprio)

$\tau \rightarrow$ Tempo próprio da partícula (tempo medido no referencial da própria partícula)

$\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}$ → Símbolos de Christoffel (conexão), que codificam a curvatura do espaço-tempo

x^{μ}, x^{ν} → Coordenadas espaço-temporais

$\frac{dx^{\mu}}{d\tau}, \frac{dx^{\nu}}{d\tau}$ → Componentes da velocidade no espaço-tempo (4-velocidade)

Essa equação evidencia que a trajetória de um corpo livre independe de sua massa ou composição, sendo determinada exclusivamente pela geometria do espaço-tempo. Tal resultado constitui uma generalização relativística do princípio de inércia e fornece a base matemática para a interpretação geométrica da gravitação.

O Princípio da Covariância Geral complementa o Princípio da Equivalência ao estabelecer que as leis da física devem ser expressas em formas matemáticas válidas sob qualquer transformação diferenciável de coordenadas. Em termos formais, isso implica que as equações fundamentais da teoria devem ser escritas em linguagem tensorial, garantindo sua invariância sob transformações gerais do grupo dos difeomorfismos (Wald, 1984).

Considere uma transformação arbitrária de coordenadas:

$$x^{\mu} \rightarrow x'^{\mu} = x'^{\mu} x^{\nu} \quad 2.2.4$$

sob a qual um tensor contravariante de segunda ordem transforma-se segundo:

$$T'^{\mu\nu} = \frac{\partial x'^{\mu}}{\partial x^{\alpha}} \frac{\partial x'^{\nu}}{\partial x^{\beta}} T^{\alpha\beta} \quad 2.2.5$$

$T'^{\mu\nu}$ → Tensor transformado no novo sistema

$\frac{\partial x'^{\mu}}{\partial x^{\alpha}}$ → Jacobiano da transformação (como as coordenadas mudam)

A exigência de que as equações da física preservem sua forma sob tais transformações impõe restrições severas à estrutura matemática da teoria gravitacional. Nesse contexto, a covariância geral não é meramente uma escolha estética, mas uma condição necessária para a consistência física da Relatividade Geral (Wald, 1984).

A combinação do Princípio da Equivalência com o Princípio da Covariância Geral conduz naturalmente às equações de campo de Einstein. A curvatura do espaço-tempo, descrita pelo tensor de Riemann ($R^{\rho}{}_{\sigma\mu\nu}$), pode ser contraída para

gerar o tensor de Ricci ($R_{\mu\nu}$) e o escalar de curvatura (R), permitindo a construção do tensor de Einstein:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R \quad 2.2.6$$

$G_{\mu\nu}$ → Tensor de Einstein

$R_{\mu\nu}$ → Tensor de Ricci

$g_{\mu\nu}$ → Tensor métrico

R → Escalar de curvatura

μ, ν → Índices tensorais do espaço-tempo

Esta equação combina o tensor de Ricci, que mede parte da curvatura do espaço-tempo, com o escalar de curvatura, que resume essa curvatura em um número, para formar o tensor de Einstein $G_{\mu\nu}$. O ponto central é que essa combinação não é arbitrária, ela é escolhida porque satisfaz uma propriedade essencial: sua divergência covariante é nula. Isso permite compatibilizar a geometria com a conservação local de energia e momento quando se escreve a equação de campo de Einstein. Um erro conceitual comum é pensar que $R_{\mu\nu}$ sozinho bastaria para representar a gravitação. Não basta, porque ele não possui, isoladamente, a estrutura necessária para garantir a consistência física da teoria na forma exigida. O tensor de Einstein não é apenas “mais um tensor”: ele é a forma geométrica adequada para conectar curvatura e conteúdo material do universo, o qual satisfaz identidades geométricas fundamentais, como a identidade de Bianchi, garantindo automaticamente a conservação local da energia e do momento:

$$\nabla_{\mu} T^{\mu\nu} = 0 \quad 2.2.7$$

Esses resultados demonstram que os princípios fundamentais da Relatividade Geral não são postulados independentes, mas elementos profundamente interligados que emergem de uma estrutura geométrica coerente. O Princípio da Equivalência fornece a interpretação física da gravitação como geometria, enquanto o Princípio da Covariância Geral assegura a universalidade e a consistência matemática das leis físicas em qualquer sistema de referência.

Do ponto de vista científico e epistemológico, esses princípios distinguem a

Relatividade Geral de teorias gravitacionais baseadas em campos escalares ou vetoriais definidos sobre um espaço-tempo fixo. Na teoria de Einstein, o próprio espaço-tempo torna-se um objeto dinâmico, cuja geometria responde à presença de matéria e energia. Essa concepção representa uma mudança profunda na compreensão da gravitação e fundamenta as previsões experimentais e observacionais confirmadas ao longo do último século, incluindo a deflexão da luz, a dilatação gravitacional do tempo e a emissão de ondas gravitacionais (Will, 2014).

2.3 O ensino de Física no Ensino Médio e os desafios da aprendizagem conceitual

O ensino de Física no Ensino Médio tem sido historicamente caracterizado por abordagens predominantemente transmissíveis, nas quais o professor assume o papel central de expositor do conhecimento e os estudantes são frequentemente sujeitos a uma postura passiva frente aos conteúdos apresentados. Nesse modelo, a aprendizagem costuma ser associada à capacidade de resolver exercícios padronizados e aplicar fórmulas previamente apresentadas, o que favorece uma ênfase excessiva nos aspectos algorítmicos da disciplina em detrimento da compreensão conceitual dos fenômenos físicos (Moreira, 2018; Studart, 2019). Como consequência, muitos estudantes desenvolvem uma relação instrumental com a Física, percebendo-a como um conjunto de procedimentos matemáticos descontextualizados, pouco conectados à interpretação da realidade natural.

Diversas investigações em ensino de Física apontam que esse tipo de abordagem contribui para a formação de aprendizagens superficiais, marcadas pela memorização mecânica e pela baixa capacidade de transferência do conhecimento para novas situações, como afirma Moreira (2018). Mesmo quando os estudantes obtêm êxito em avaliações formais, frequentemente demonstram dificuldades em explicar qualitativamente fenômenos físicos, interpretar gráficos, estabelecer relações entre diferentes grandezas ou articular conceitos fundamentais de forma coerente. Tal cenário evidencia uma dissociação entre desempenho procedimental e compreensão conceitual, revelando limitações significativas do modelo tradicional de ensino.

Esses desafios tornam-se ainda mais evidentes no contexto da introdução de conteúdos de Física Moderna no Ensino Médio. Diferentemente da Física Clássica, muitos desses conteúdos envolvem conceitos abstratos, contraintuitivos e distantes

da experiência cotidiana dos estudantes, como a relatividade do tempo e a estrutura do espaço-tempo. Além disso, tais temas exigem rupturas conceituais profundas em relação a noções previamente consolidadas, demandando um nível mais elevado de reflexão epistemológica sobre a natureza da ciência e os limites dos modelos físicos (Ostermann & Moreira, 2000).

A ausência de estratégias didáticas adequadas para lidar com esse grau de abstração pode resultar na fragmentação do conhecimento e no fortalecimento de concepções alternativas ou intuitivas que entram em conflito com o conhecimento científico formal. Quando apresentados de forma excessivamente matematizada ou puramente expositiva, os conteúdos de Física Moderna tendem a ser percebidos como inacessíveis ou irrelevantes, o que reforça sentimentos de desmotivação e distanciamento em relação à disciplina (Stuart, 2019). Nesse sentido, a simples inclusão desses tópicos nos currículos não garante, por si só, uma aprendizagem significativa ou conceitualmente sólida.

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) reconhece explicitamente a necessidade de superar práticas pedagógicas centradas exclusivamente na transmissão de conteúdos e na resolução mecânica de exercícios. O documento enfatiza o desenvolvimento de competências relacionadas à análise crítica, à argumentação científica, à resolução de problemas e à compreensão de fenômenos naturais em diferentes escalas, incluindo aquelas que extrapolam a experiência sensorial direta (Brasil, 2017). Essa orientação curricular demanda uma reorganização das práticas de ensino, de modo a promover a participação ativa dos estudantes no processo de construção do conhecimento.

Nesse contexto, torna-se fundamental a adoção de metodologias que favoreçam a aprendizagem conceitual profunda, estimulando o confronto de ideias, a explicitação de concepções prévias e a construção progressiva de significados científicos. Abordagens que valorizam a interação entre os estudantes, o uso de modelos conceituais, experimentos reais ou análogos e a problematização de situações físicas relevantes apresentam maior potencial para promover aprendizagens duradouras e alinhadas às diretrizes curriculares contemporâneas (Moreira, 2018). Assim, enfrentar os desafios da aprendizagem conceitual em Física no Ensino Médio implica repensar não apenas os conteúdos ensinados, mas, sobretudo, as estratégias didáticas utilizadas para mediar a relação entre os estudantes e o conhecimento científico.

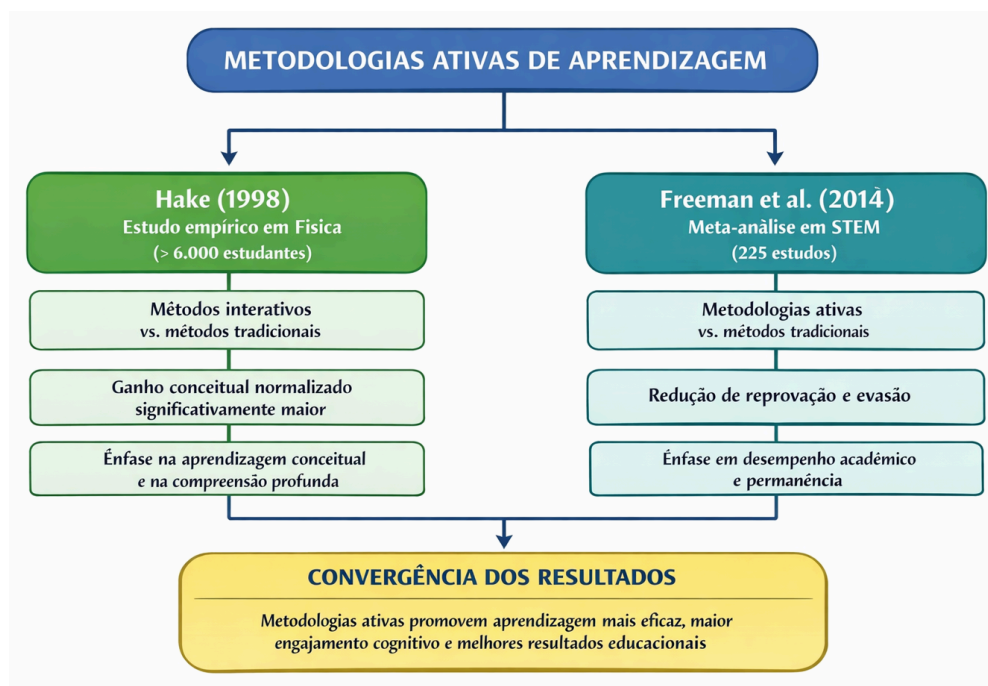
2.4 Metodologias ativas no ensino de Física

As metodologias ativas de aprendizagem configuram um conjunto de abordagens pedagógicas que têm como característica central o deslocamento do estudante de uma posição passiva, tradicionalmente associada à escuta e à reprodução de informações, para um papel protagonista no processo de construção do conhecimento. Nessas metodologias, Freeman et al. (2014) argumentam que a aprendizagem ocorre por meio do engajamento cognitivo ativo, no qual os estudantes são incentivados a discutir ideias, argumentar com base em evidências, tomar decisões, formular hipóteses e refletir criticamente sobre suas próprias concepções, enquanto o professor assume a função de mediador e organizador das situações de aprendizagem.

No contexto do ensino de Física, esse deslocamento epistemológico é particularmente relevante, uma vez que a disciplina envolve conceitos abstratos, modelos teóricos e representações matemáticas que dificilmente são apropriados de forma significativa por meio de abordagens exclusivamente expositivas. Estudos em pesquisa em ensino de Ciências indicam que a aprendizagem conceitual em Física requer a ativação de conhecimentos prévios, o confronto de concepções alternativas e a construção progressiva de modelos explicativos, processos que são favorecidos por estratégias didáticas que promovem a participação ativa dos estudantes (Hake, 1998; Moreira, 2018).

Resultados empíricos amplamente citados na literatura (Moraes, 2022, Ramalho, 2019, Studart, 2019), evidenciam os impactos positivos das metodologias ativas no desempenho conceitual dos estudantes. O estudo clássico de Hake (1998), envolvendo mais de seis mil alunos em cursos introdutórios de Física, demonstrou que turmas que utilizaram métodos interativos obtiveram ganhos conceituais significativamente superiores aos observados em turmas submetidas a métodos tradicionais. De forma convergente, a meta-análise conduzida por Freeman et al. (2014), abrangendo 225 estudos em áreas de Ciências, Tecnologia, Engenharia e Matemática (STEM), indicou que metodologias ativas reduzem taxas de reprovação e evasão, além de promoverem melhorias consistentes no desempenho acadêmico.

Figura 3: Convergência Hake-Freeman



Fonte: O Autor

Além dos ganhos quantitativos em avaliações conceituais, as metodologias ativas favorecem o desenvolvimento de habilidades cognitivas de ordem superior, tais como análise, síntese, avaliação e argumentação científica. Essas habilidades são essenciais para a compreensão de conceitos físicos complexos e para a interpretação de fenômenos que extrapolam a experiência sensorial imediata, como aqueles associados à Física Moderna e Contemporânea. Nesse sentido, Freeman et al. (2014) defendem que ao estimular o debate entre pares e a explicitação de raciocínios, essas abordagens contribuem para que os estudantes desenvolvam maior autonomia intelectual e capacidade de reflexão crítica sobre o conhecimento científico.

Entretanto, a literatura também aponta que a simples adoção de metodologias ativas não garante, por si só, melhorias significativas na aprendizagem. A eficácia dessas abordagens está fortemente condicionada à qualidade do planejamento didático, à clareza dos objetivos conceituais e à coerência entre a metodologia escolhida, o conteúdo trabalhado e o contexto educacional no qual a intervenção ocorre (Moreira, 2018). Metodologias ativas mal estruturadas ou aplicadas de forma mecânica podem resultar em atividades superficiais, com baixo impacto conceitual,

ou mesmo em confusão cognitiva por parte dos estudantes.

Outro aspecto crítico diz respeito ao papel do professor (Ostermann & Moreira, 2000). Diferentemente do que por vezes se supõe, metodologias ativas não implicam a diminuição da atuação docente, mas exigem um professor com elevado domínio conceitual e didático, capaz de formular boas questões, antecipar dificuldades conceituais, intervir estrategicamente durante as discussões e promover a articulação entre as ideias dos estudantes e os modelos científicos formais. Desse modo, o professor atua como mediador epistemológico, orientando o processo de construção do conhecimento sem retirar do estudante a responsabilidade pelo próprio aprendizado, como advoga Moreira (2018).

Assim, a adoção de metodologias ativas no ensino de Física deve ser compreendida como uma escolha pedagógica intencional, alinhada aos objetivos de aprendizagem e às especificidades do conteúdo abordado. Quando articuladas a recursos didáticos adequados, como experimentos, simulações computacionais ou análogos físicos, essas metodologias apresentam grande potencial para promover aprendizagens conceituais profundas, especialmente em tópicos que envolvem elevado grau de abstração. Nesse contexto, destaca-se a importância de investigar estratégias que combinem metodologias ativas com recursos que facilitem a visualização e a modelagem de fenômenos físicos, contribuindo para uma compreensão mais significativa e integrada dos conceitos científicos.

2.5 O método Peer Instruction

O Peer Instruction (PI) é uma metodologia ativa de aprendizagem desenvolvida por Eric Mazur na década de 1990, a partir de investigações sistemáticas sobre as dificuldades conceituais persistentes apresentadas por estudantes em cursos introdutórios de Física, mesmo após exposições teóricas bem estruturadas (Mazur, 2015). O método foi concebido com o objetivo explícito de deslocar o foco do ensino da mera transmissão de informações para a promoção da aprendizagem conceitual, enfatizando a compreensão profunda dos princípios físicos em detrimento da resolução mecânica de exercícios.

A estrutura básica do Peer Instruction organiza-se em ciclos curtos de ensino-aprendizagem, nos quais o professor apresenta inicialmente uma questão conceitual de múltipla escolha, denominada *Concept Question*. Essas questões são cuidadosamente elaboradas para explorar conceitos centrais do conteúdo,

frequentemente incorporando alternativas que representam concepções alternativas comuns entre os estudantes. Em um primeiro momento, os alunos respondem individualmente à questão, o que favorece o engajamento cognitivo inicial e a explicitação de suas concepções prévias (Mazur, 2015).

Após essa primeira resposta, os estudantes são incentivados a discutir suas escolhas em pequenos grupos, geralmente formados por pares ou trios. Essa etapa de discussão entre pares constitui o núcleo epistemológico do método, uma vez que promove o confronto de ideias divergentes, a argumentação verbal e a necessidade de justificar raciocínios com base em princípios físicos. Em seguida, realiza-se uma nova votação, permitindo ao professor avaliar mudanças no padrão de respostas e decidir sobre a necessidade de intervenções adicionais ou aprofundamento conceitual (Crouch & Mazur, 2001).

No método Peer Instruction, Mazur propõe o uso de faixas percentuais de respostas corretas como critério pedagógico para orientar a tomada de decisões durante a aula, funcionando como um mecanismo de diagnóstico em tempo real da compreensão conceitual dos estudantes (Mazur, 2015). De modo geral, quando menos de aproximadamente 30% da turma seleciona a alternativa correta em uma votação inicial, recomenda-se que o professor interrompa a atividade de discussão entre pares e retome a explicação conceitual, uma vez que o baixo nível de compreensão dificulta a argumentação produtiva entre os estudantes. Quando a taxa de acertos se situa entre cerca de 30% e 70%, considera-se que há diversidade suficiente de concepções para que a discussão entre pares seja efetiva, sendo essa a faixa ideal para promover o confronto de ideias e a aprendizagem conceitual por meio do diálogo argumentativo. Por outro lado, quando mais de 70% dos estudantes respondem corretamente já na primeira votação, Mazur sugere avançar no conteúdo ou aprofundar a discussão, pois o conceito central foi majoritariamente assimilado. Esse uso sistemático das porcentagens transforma a avaliação em um instrumento formativo, permitindo ao professor ajustar dinamicamente suas intervenções didáticas e alinhar o ritmo da aula ao nível real de compreensão conceitual da turma (Crouch & Mazur, 2001; Freeman et al., 2014).

Figura 4: Fluxograma das etapas do PI



Fonte: O Autor

Do ponto de vista teórico, o Peer Instruction encontra sólido embasamento na Teoria da Aprendizagem Significativa, segundo a qual a aprendizagem ocorre de forma mais efetiva quando novas informações podem ser ancoradas em estruturas cognitivas previamente existentes, de maneira não arbitrária e substantiva (Moreira, 2018). Ao explicitar concepções prévias e promover o debate argumentativo, o PI cria condições favoráveis para que conflitos cognitivos emergem e sejam resolvidos coletivamente, contribuindo para a reorganização conceitual dos estudantes.

Estudos empíricos demonstram de forma consistente a eficácia do Peer Instruction no ensino de Física. Crouch e Mazur (2001) observaram que estudantes submetidos a aulas baseadas em PI apresentaram ganhos conceituais significativamente superiores aos obtidos em turmas tradicionais, mesmo quando o tempo dedicado à exposição formal do conteúdo foi reduzido. Esses resultados indicam que a qualidade da interação cognitiva e social durante o processo de aprendizagem pode ser mais determinante do que a quantidade de informação transmitida pelo professor.

Além dos ganhos conceituais, o Peer Instruction favorece o desenvolvimento de habilidades cognitivas de ordem superior, como a capacidade de argumentação

científica, a análise crítica de alternativas conceituais e a metacognição. Ao verbalizar seus raciocínios e confrontá-los com os de seus colegas, os estudantes tornam-se mais conscientes de seus próprios processos de pensamento, o que contribui para aprendizagens mais duradouras e transferíveis para novos contextos (Mazur, 1997).

No contexto brasileiro, diversas pesquisas têm investigado a aplicação do Peer Instruction em diferentes níveis de ensino e tópicos da Física. Araújo et al. (2017) relatam resultados positivos em turmas de Ensino Médio e Ensino Superior, com destaque para melhorias no desempenho conceitual e no engajamento dos estudantes em conteúdos como circuitos elétricos, cinemática e termodinâmica. De forma convergente, estudos como o de Ramalho (2019) e Costa (2021) apontam que o PI contribui para a criação de ambientes de aprendizagem mais participativos, nos quais os estudantes assumem papel ativo na construção do conhecimento.

Apesar desses resultados promissores, a aplicação do Peer Instruction em conteúdos de Física Moderna no Ensino Médio ainda é pouco explorada na literatura nacional. Essa lacuna pode ser atribuída, em parte, à elevada abstração desses temas e à escassez de recursos didáticos que auxiliem na mediação conceitual. Nesse sentido, investigações que articulem o Peer Instruction ao uso de modelos, simulações ou análogos físicos mostram-se particularmente relevantes, pois ampliam as possibilidades de compreensão de conceitos que não podem ser diretamente observados ou experimentados.

Assim, o Peer Instruction apresenta-se como uma metodologia ativa especialmente adequada para enfrentar os desafios da aprendizagem conceitual em Física, ao combinar fundamentação teórica sólida, evidências empíricas robustas e flexibilidade didática. Sua aplicação em tópicos conceitualmente desafiadores, como os associados à Física Moderna, constitui um campo fértil de pesquisa, alinhado às demandas contemporâneas do ensino de Ciências e às diretrizes curriculares nacionais.

2.6 O ensino de Física Moderna no Ensino Médio

A inserção de conteúdos de Física Moderna no Ensino Médio tem sido amplamente defendida por pesquisadores da área de Ensino de Física como uma estratégia fundamental para aproximar o currículo escolar da ciência produzida na atualidade, além de contribuir para uma compreensão mais ampla da natureza do

conhecimento científico e de seus processos de construção histórica e epistemológica (Ostermann & Moreira, 2000). Ao abordar temas como relatividade, física quântica e cosmologia, o ensino escolar pode superar uma visão fragmentada e excessivamente clássica da Física, oferecendo aos estudantes uma perspectiva mais coerente com o desenvolvimento científico dos séculos XX e XXI.

No entanto, a implementação efetiva desses conteúdos enfrenta desafios significativos. Entre os principais obstáculos destacam-se a elevada complexidade conceitual dos temas, a predominância de formalismos matemáticos avançados nos textos de referência e a ausência, em muitos casos, de formação específica dos professores para tratar desses assuntos em nível escolar. Soma-se a isso a carência de materiais didáticos adequados, que consigam traduzir, isto é, didatizar conceitos sofisticados em abordagens acessíveis, sem comprometer a coerência científica dos modelos apresentados (Ostermann & Moreira, 2000; Morais, 2022).

No caso específico da Teoria da Relatividade Geral, essas dificuldades tornam-se ainda mais evidentes. A teoria baseia-se em uma descrição geométrica da gravitação, envolvendo conceitos como espaço-tempo curvo, métricas, geodésicas e tensores, cuja formalização matemática extrapola amplamente o escopo tradicional do Ensino Médio. Essa distância entre o formalismo teórico e o nível de abstração esperado dos estudantes frequentemente leva à exclusão da Relatividade Geral dos currículos escolares ou à sua abordagem meramente superficial, restrita a curiosidades ou narrativas históricas desconectadas de seus fundamentos conceituais (Marques & Soltau, 2022).

Apesar dessas limitações, diversos estudos indicam que os princípios conceituais centrais da Relatividade Geral podem ser trabalhados qualitativamente no Ensino Médio, desde que sejam adotadas estratégias didáticas adequadas. Abordagens que utilizam modelos conceituais, analogias físicas, simulações computacionais e análogos mecânicos têm se mostrado promissoras para mediar a compreensão de ideias abstratas, como a curvatura do espaço-tempo e a influência da gravidade sobre o tempo, sem recorrer ao formalismo matemático completo da teoria (Ferreira et al., 2021). Nessa perspectiva, o foco desloca-se do cálculo para a interpretação física e para a construção de significados conceituais.

Entre os temas associados à Relatividade Geral, os buracos negros destacam-se como um tópico particularmente motivador no contexto escolar. Esses objetos astrofísicos, amplamente divulgados na mídia científica e cultural, despertam

curiosidade e interesse entre os estudantes, funcionando como um ponto de partida eficaz para discussões mais profundas sobre conceitos relativísticos fundamentais. A partir do estudo dos buracos negros, é possível introduzir noções como horizonte de eventos, dilatação gravitacional do tempo e limites da causalidade, articulando-as com uma visão contemporânea da gravitação (Hawking, 1988; Morais, 2022). Além de seu potencial motivacional, os buracos negros permitem estabelecer conexões interdisciplinares com áreas como Astronomia, Cosmologia e Filosofia da Ciência, favorecendo reflexões sobre os limites do conhecimento científico, o papel dos modelos teóricos e a natureza provisória das explicações científicas.

Quando abordados de forma conceitualmente estruturada, esses temas contribuem para o desenvolvimento de uma compreensão mais sofisticada da ciência, alinhada às competências previstas na BNCC (Brasil, 2017) que enfatiza a análise crítica, a argumentação e a compreensão de fenômenos naturais em diferentes.

Assim, o ensino de Física Moderna no Ensino Médio, e em particular da Relatividade Geral, não deve ser compreendido como uma tentativa de antecipar formalismos universitários, mas como uma oportunidade de promover aprendizagens conceituais significativas e contextualizadas. A adoção de estratégias didáticas que combinem metodologias ativas, recursos visuais e modelos análogos mostra-se essencial para tornar esses conteúdos acessíveis, preservando sua integridade científica e ampliando o potencial formativo do ensino de Física no nível médio.

2.7 O uso de análogos no ensino de Física

Análogos e modelos físicos desempenham um papel central no ensino de Física, especialmente quando se trata da mediação de conceitos abstratos, não diretamente observáveis ou cuja formalização matemática ultrapassa o nível de escolaridade dos estudantes. De modo geral, um análogo pode ser entendido como uma representação simplificada que preserva determinadas relações estruturais de um fenômeno físico alvo, permitindo que o aprendiz utilize conhecimentos prévios para construir novos significados conceituais (Tavares, Boas & Oliveira, 1993). No contexto educacional, o uso de análogos possibilita a criação de pontes cognitivas entre o conhecimento cotidiano e os modelos científicos formais.

No ensino de Física, análogos mecânicos têm sido amplamente utilizados para auxiliar a compreensão de diversos conceitos fundamentais. Os exemplos

clássicos incluem o uso de superfícies elásticas para representar campos gravitacionais, sistemas massa-mola para modelar oscilações e ondas, e circuitos hidráulicos como análogos de circuitos elétricos. Duit (1991) enfatiza que esses recursos permitem aos estudantes visualizar e manipular aspectos qualitativos dos fenômenos, favorecendo a construção de representações mentais mais consistentes e a compreensão das relações entre grandezas físicas.

Do ponto de vista teórico, o uso de analogias encontra respaldo em abordagens construtivistas da aprendizagem, segundo as quais o conhecimento não é simplesmente transmitido, mas construído ativamente pelo sujeito a partir da interação entre novas informações e estruturas cognitivas pré-existentes. Nesse sentido, os análogos funcionam como mediadores semióticos, auxiliando na reorganização conceitual dos estudantes e na superação de concepções intuitivas que entram em conflito com os modelos científicos (Moreira, 2018). Contudo, essa mediação só se efetiva plenamente quando o uso do análogo é acompanhado de reflexão crítica e orientação pedagógica adequada.

Diversos autores alertam para os riscos associados ao uso indiscriminado de analogias no ensino de Ciências. Conforme destacado por Duit (1991), toda analogia envolve simultaneamente correspondências e limitações: enquanto certos aspectos do sistema análogo reproduzem relações relevantes do sistema alvo, outros diferem substancialmente e não devem ser extrapolados. A não explicitação desses limites pode levar à formação ou ao reforço de concepções alternativas, dificultando a aprendizagem conceitual em vez de favorecê-la. Assim, o professor desempenha papel fundamental ao explicitar quais elementos do análogo são válidos e quais devem ser problematizados ou descartados.

Figura 5: Concepção acerca do uso de análogos



Fonte: O Autor

No caso específico da Teoria da Relatividade Geral, o uso de análogos apresenta tanto potencialidades quanto desafios particulares. A descrição geométrica da gravitação, baseada na curvatura do espaço-tempo, envolve conceitos altamente abstratos e distantes da experiência cotidiana. Análogos mecânicos, como superfícies deformáveis representando a curvatura causada por massas, têm sido amplamente utilizados para oferecer uma visualização qualitativa desses efeitos, auxiliando na compreensão de ideias como atração gravitacional e desvio de trajetórias (Morais, 2022). Quando bem empregados, esses análogos permitem discutir a gravidade como efeito geométrico, em contraste com a concepção clássica de força.

Entretanto, tais representações também possuem limitações importantes que precisam ser explicitadas. Superfícies bidimensionais deformadas, por exemplo, podem induzir interpretações equivocadas ao sugerir que a gravidade atua “para baixo” em um espaço externo, quando, na Relatividade Geral, a curvatura ocorre no próprio espaço-tempo e não em um meio externo tridimensional. Além disso, esses análogos frequentemente enfatizam a curvatura espacial, negligenciando o papel fundamental da dimensão temporal na dinâmica relativística. A discussão crítica dessas limitações é essencial para evitar simplificações excessivas e garantir a

coerência científica da abordagem conforme Morais (2022).

A eficácia pedagógica dos análogos aumenta significativamente quando eles são articulados a metodologias ativas de aprendizagem. Ao serem utilizados em conjunto com estratégias como o Peer Instruction, os análogos deixam de ser meros recursos ilustrativos e passam a funcionar como catalisadores de discussão conceitual. A observação, a manipulação e a problematização coletiva do análogo, mediadas por questões conceituais cuidadosamente elaboradas, favorecem a explicitação de concepções prévias e o confronto de interpretações divergentes, promovendo a construção coletiva de significados científicos.

Dessa forma, o uso de análogos no ensino de Física deve ser compreendido como uma estratégia didática intencional, que exige planejamento, domínio conceitual por parte do professor e articulação com objetivos pedagógicos claros. Quando empregados de maneira crítica e integrada a metodologias ativas, os análogos físicos constituem ferramentas poderosas para a mediação de conceitos abstratos, contribuindo para aprendizagens conceituais mais profundas e alinhadas às demandas contemporâneas do ensino de Ciências.

2.7.1 Proposta de Análogo: Concepção, Construção e Potencial Didático

A construção de modelos análogos tem sido amplamente utilizada no ensino de Física como estratégia para tornar conceitos abstratos mais acessíveis, especialmente no contexto da Física Moderna. Nesse sentido, o análogo mecânico de buracos negros desenvolvido neste trabalho foi concebido com o objetivo de representar, de forma qualitativa e visual, aspectos fundamentais da Relatividade Geral, particularmente a curvatura do espaço-tempo e a dinâmica associada a campos gravitacionais intensos. A ideia central parte da analogia entre o escoamento de partículas em direção a um dreno e o comportamento de corpos sob a influência gravitacional de um buraco negro, permitindo uma transposição didática de conceitos altamente abstratos.

A concepção do dispositivo baseia-se em um sistema de dois reservatórios interligados, no qual o recipiente superior contém areia ou outro material granular que escoar por um orifício central, simulando a presença de uma singularidade gravitacional. O recipiente inferior atua como coletor, enquanto uma estrutura de suporte mantém o sistema estável e visível para observação. A escolha de materiais simples, como garrafas plásticas reutilizadas, mangueiras e suporte de madeira, visa

garantir baixo custo e facilidade de reprodução em ambientes escolares, especialmente em contextos com poucos recursos laboratoriais.

O processo de construção do análogo é relativamente simples e pode ser realizado pelo próprio professor ou, preferencialmente, em conjunto com os estudantes, promovendo uma abordagem investigativa. Inicialmente, prepara-se o recipiente superior com um orifício central controlado, conectado a um tubo ou mangueira que conduz o material até o recipiente inferior. A estrutura de madeira serve para manter o alinhamento vertical do sistema, como mostra a figura 6, garantindo um escoamento contínuo e visível. A adição de pequenas esferas (como bolinhas de papel alumínio) permite observar trajetórias diferenciadas, enriquecendo a análise qualitativa do fenômeno.

Figura 6: Análogo mecânico



Fonte: O Autor

Do ponto de vista didático, um dos principais benefícios do análogo reside na sua capacidade de tornar visível um fenômeno que, na realidade, é matematicamente descrito por equações complexas e não diretamente observável. Ao observar o movimento da areia em direção ao “dreno”, os estudantes podem construir uma representação mental da ideia de curvatura do espaço-tempo, ainda que de forma simplificada. Essa visualização contribui para a redução da carga cognitiva associada ao aprendizado de conceitos abstratos, favorecendo a aprendizagem significativa.

Entretanto, é importante explicitar os limites da analogia para evitar interpretações equivocadas. No modelo proposto, há uma força efetiva (gravidade

terrestre) atuando sobre a areia, enquanto na Relatividade Geral a gravidade não é uma força no sentido newtoniano, mas sim uma manifestação da geometria do espaço-tempo. Portanto, o professor deve mediar a atividade destacando que o análogo representa um modelo heurístico, útil para compreensão inicial, mas que não substitui a formalização teórica. Essa problematização é essencial para o desenvolvimento de um pensamento científico mais crítico.

A utilização do análogo em sala de aula pode ser potencializada por meio da metodologia Peer Instruction, permitindo que os estudantes discutam e confrontem suas ideias a partir de questões conceituais (Concep Question). Por exemplo, pode-se questionar o que aconteceria com uma partícula próxima ao “horizonte de eventos” ou como a velocidade do escoamento se relaciona com a intensidade do campo gravitacional. Essas discussões promovem o engajamento ativo dos alunos e favorecem a construção coletiva do conhecimento, conforme proposto por Mazur.

Diversos conceitos de Relatividade Geral podem ser explorados a partir dessa representação. Entre eles, destacam-se: a curvatura do espaço-tempo, representada pelo formato do fluxo convergente; o horizonte de eventos, associado à região próxima ao dreno onde o movimento se torna inevitável; a noção de trajetória geodésica, interpretada como o caminho seguido pelas partículas no sistema; e a ideia de singularidade. Embora o modelo não represente fielmente todos os aspectos da teoria, ele oferece uma base concreta para introdução desses conceitos em nível qualitativo.

Ressalta-se que o uso desse análogo deve estar integrado a uma sequência didática bem estruturada, articulando momentos de exploração, problematização, formalização e avaliação. Quando utilizado de forma planejada, o dispositivo não apenas auxilia na compreensão de conteúdos de Física Moderna, mas também contribui para o desenvolvimento de habilidades como argumentação, análise crítica e construção de modelos, alinhando-se às competências previstas na BNCC. Dessa forma, o análogo mecânico de buracos negros se configura como um recurso didático potente e viável para o ensino de conceitos avançados no Ensino Médio.

3 METODOLOGIA

3.1 Natureza e abordagem da pesquisa

A presente pesquisa caracteriza-se como pesquisa aplicada (Gil, 2017), uma

vez que está orientada para a resolução de um problema concreto do contexto educacional, especificamente relacionado ao ensino de conteúdos de Física Moderna no Ensino Médio, por meio do desenvolvimento, implementação e análise de um produto educacional. Diferentemente das pesquisas de natureza exclusivamente teórica, a pesquisa aplicada busca gerar conhecimentos com potencial de uso imediato, contribuindo diretamente para a melhoria de práticas pedagógicas e para a inovação no ensino de Ciências (Marconi & Lakatos, 2017).

Do ponto de vista metodológico, adota-se uma abordagem mista, combinando procedimentos quantitativos e qualitativos. A utilização dessa abordagem justifica-se pela necessidade de analisar tanto os resultados mensuráveis da aprendizagem conceitual dos estudantes quanto os aspectos interpretativos associados às interações, argumentações e construções de significado promovidas ao longo das atividades didáticas (Creswell, 2014). Segundo esses autores, pesquisas educacionais que envolvem intervenções em sala de aula se beneficiam de métodos mistos, pois permitem uma compreensão mais abrangente e robusta do fenômeno investigado.

A dimensão quantitativa da pesquisa está relacionada à análise dos desempenhos dos estudantes em instrumentos de avaliação conceitual aplicados antes e após a intervenção didática, possibilitando a identificação de variações no nível de compreensão dos conceitos abordados. Nesse sentido, Hake (1998) salienta que esse tipo de análise permite a utilização de indicadores consolidados na literatura em ensino de Física, como o ganho de aprendizagem normalizado, amplamente empregado em estudos que investigam o impacto de metodologias ativas.

A dimensão qualitativa concentra-se na interpretação das interações discursivas entre os estudantes durante a aplicação do método Peer Instruction, bem como na análise de suas justificativas, questionamentos e concepções expressas ao longo das atividades. Esse enfoque possibilita compreender como os estudantes constroem significados, confrontam ideias e reformulam suas concepções diante de situações-problema, aspectos centrais para a aprendizagem significativa (Moreira, 2018). A abordagem qualitativa também se mostra particularmente adequada para investigar processos de ensino-aprendizagem envolvendo conceitos abstratos e contraintuitivos, como aqueles associados à Teoria da Relatividade Geral.

Além disso, a pesquisa pode ser classificada como um estudo de intervenção

pedagógica, na medida em que o pesquisador atua diretamente no planejamento, execução e avaliação da proposta didática implementada em sala de aula (Bogdan & Biklen, 2010). Nesse tipo de investigação, o professor-pesquisador assume um papel ativo, refletindo sistematicamente sobre sua prática e utilizando os dados coletados para analisar os efeitos da intervenção proposta.

Assim, a combinação entre pesquisa aplicada, abordagem mista e intervenção pedagógica constitui um arcabouço metodológico coerente com os objetivos deste trabalho, permitindo avaliar, de forma fundamentada, as contribuições e limitações do uso de um análogo mecânico de buracos negros articulado à metodologia Peer Instruction para o ensino de conceitos de Relatividade Geral no Ensino Médio.

3.2 Contexto da pesquisa e caracterização da escola

A pesquisa foi desenvolvida na Escola Estadual Professora Cecília Ferreira da Silva, na cidade de Manaus - AM, localizada na periferia urbana e atende estudantes do Ensino Médio regular. A instituição oferece turmas nos turnos diurno e noturno, com organização curricular alinhada às diretrizes da BNCC, contemplando a área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias. A escolha desse contexto justifica-se por representar uma realidade escolar típica da rede pública brasileira, o que confere maior potencial de transferibilidade aos resultados obtidos (Brasil, 2017).

A escola dispõe de salas de aula convencionais, equipadas com quadro branco. Embora não possua laboratório de Física plenamente equipado para experimentação avançada, o espaço escolar permite a realização de atividades demonstrativas e o uso de materiais de baixo custo, condição considerada adequada para a implementação do produto educacional proposto. Essa característica é relevante, uma vez que o análogo mecânico desenvolvido nesta pesquisa foi concebido justamente para contextos escolares com infraestrutura limitada, buscando ampliar sua aplicabilidade em diferentes realidades educacionais.

As aulas de Física no Ensino Médio da instituição seguem uma carga horária semanal compatível com a legislação vigente, duas aulas semanais de aproximadamente 50 minutos, sendo tradicionalmente organizadas em aulas expositivas intercaladas com aulas práticas (com resolução de exercícios). Tal configuração reflete um modelo de ensino ainda predominante em muitas escolas brasileiras, marcado pela centralidade do professor e pela ênfase em procedimentos

algorítmicos (Moreira, 2018). Esse cenário reforça a pertinência da investigação, ao possibilitar a análise dos efeitos da introdução de metodologias ativas, como o Peer Instruction, em um ambiente escolar característico do ensino tradicional.

A intervenção pedagógica foi realizada no horário regular das aulas de Física, sem alterações no calendário escolar ou na organização administrativa da instituição. Essa opção metodológica teve como objetivo preservar a autenticidade do contexto educacional e evitar interferências externas que pudessem comprometer a validade dos resultados. Segundo Bogdan e Biklen (2010), pesquisas conduzidas em ambientes naturais de ensino tendem a produzir dados mais fidedignos sobre os processos de aprendizagem.

Por fim, destaca-se que a escola atende a um público estudantil heterogêneo, com diferentes níveis de desempenho acadêmico e acesso desigual a recursos educacionais extraclasse. Essa diversidade constitui um elemento relevante para a análise da proposta didática, uma vez que permite avaliar o potencial do uso de análogos físicos e do Peer Instruction em promover a participação ativa e a compreensão conceitual em turmas com perfis variados, aspecto consonante com as orientações da BNCC quanto à promoção da equidade educacional.

3.3 Caracterização dos participantes da pesquisa

A intervenção pedagógica foi realizada com estudantes de duas turmas da terceira série do Ensino Médio, pertencentes à mesma instituição de ensino, sendo uma turma do turno matutino e outra do turno vespertino. Cada turma era composta por 20 estudantes, totalizando 40 participantes envolvidos diretamente nas atividades propostas. A faixa etária dos alunos situava-se entre 17 e 18 anos, compatível com a etapa final da Educação Básica.

A escolha da terceira série do Ensino Médio justifica-se por se tratar de um momento em que os estudantes já tiveram contato com conceitos fundamentais da Física Clássica, como leis do movimento, gravitação newtoniana e noções básicas de energia, o que constitui um pré-requisito conceitual importante para a introdução de tópicos de Física Moderna. Além disso, essa etapa da escolarização favorece discussões de natureza mais abstrata e reflexiva, alinhadas às competências previstas para a área de Ciências da Natureza na Base Nacional Comum Curricular (Brasil, 2017).

A participação dos estudantes ocorreu durante o horário regular das aulas de

Física, respeitando os princípios éticos da pesquisa educacional. Os alunos foram informados sobre os objetivos gerais da proposta didática e sobre a natureza investigativa das atividades, sendo assegurado o anonimato na análise e divulgação dos resultados. De acordo com Bogdan & Biklen (2010), esse procedimento está em consonância com recomendações metodológicas para pesquisas em contextos escolares, que enfatizam a necessidade de preservar a integridade e a identidade dos participantes.

As duas turmas apresentavam perfis acadêmicos heterogêneos, com diferenças nos níveis de desempenho e de participação em sala de aula, característica comum em turmas do Ensino Médio da rede pública. Essa heterogeneidade foi considerada um elemento relevante para a pesquisa, uma vez que o Peer Instruction se baseia justamente na interação entre estudantes com diferentes concepções e níveis de compreensão conceitual, potencializando o conflito cognitivo e a aprendizagem significativa (Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001).

A inclusão de turmas de turnos distintos permitiu ainda observar a implementação da proposta em contextos pedagógicos variados, ampliando a confiabilidade da análise e reduzindo a influência de fatores circunstanciais específicos de um único grupo. Dessa forma, a caracterização dos participantes reforça o caráter aplicado da pesquisa e a pertinência dos resultados para realidades escolares semelhantes, especialmente no que se refere ao ensino de Física Moderna no Ensino Médio.

3.4 Descrição do Produto Educacional

O produto educacional desenvolvido nesta pesquisa consiste em um guia didático estruturado, destinado a professores do Ensino Médio. O objetivo central do produto é possibilitar a abordagem conceitual de elementos fundamentais da Teoria da Relatividade Geral, como curvatura do espaço-tempo, dilatação gravitacional do tempo e horizonte de eventos, de forma qualitativa, aplicada e pedagogicamente orientada, em consonância com as diretrizes BNCC (Brasil, 2017).

O desenvolvimento do produto educacional fundamenta-se na concepção de que modelos e análogos físicos desempenham papel essencial na mediação da aprendizagem de conceitos abstratos, ao permitir a construção de representações acessíveis sem comprometer a coerência científica (Tavares, Boas & Oliveira, 1993;

Duit, 1991). Nesse sentido, o análogo mecânico foi projetado para representar, de maneira visual e dinâmica, a influência da massa na curvatura do espaço-tempo, estabelecendo correspondências explícitas com os princípios da Relatividade Geral discutidos no Capítulo 2.

O primeiro passo descrito no guia didático refere-se à apresentação do contexto conceitual da atividade. Antes da utilização do análogo, o professor é orientado a promover uma discussão inicial com os estudantes, explorando concepções prévias sobre gravitação, espaço e tempo. Essa etapa tem como finalidade diagnosticar ideias intuitivas e preparar cognitivamente os alunos para a introdução de conceitos relativísticos, favorecendo a aprendizagem significativa (Ausubel, 2003).

Na etapa seguinte, o guia detalha a montagem e apresentação do análogo mecânico, explicitando os materiais necessários, todos de baixo custo e facilmente acessíveis no ambiente escolar. O análogo é construído de forma a permitir a representação da deformação de uma superfície sob a ação de uma massa central, analogamente à curvatura do espaço-tempo causada por objetos massivos. O guia enfatiza que essa representação não deve ser interpretada literalmente, mas como uma ferramenta heurística para apoiar a compreensão conceitual.

O terceiro passo consiste na exploração guiada do análogo, na qual os estudantes observam e manipulam o modelo sob a mediação do professor. O guia propõe questões orientadoras que relacionam o comportamento observado no análogo com conceitos como trajetória de partículas, intensidade do campo gravitacional e dependência da curvatura em relação à massa. Essa etapa visa promover o raciocínio causal e a articulação entre observação empírica e interpretação teórica, conforme Gilbert (2004).

Na sequência, o produto educacional integra explicitamente o método Peer Instruction, utilizando o análogo como suporte para a elaboração de Concept Questions (Questões Conceituais). O guia didático apresenta exemplos de questões conceituais que exploram a interpretação do modelo, incentivando os estudantes a responderem individualmente, discutirem em pequenos grupos e revisarem suas respostas, conforme a estrutura clássica do método proposto por Mazur (1997). Essa articulação busca potencializar o conflito cognitivo e a reconstrução conceitual.

O sexto passo refere-se à discussão coletiva mediada, realizada após as rodadas de votação do Peer Instruction. O guia orienta o professor a retomar os

resultados das respostas, destacando argumentos corretos e problematizando concepções equivocadas, sempre relacionando o análogo às limitações do modelo físico. Essa explicitação dos limites da analogia é considerada fundamental para evitar a consolidação de interpretações inadequadas (Duit, 1991).

Em seguida, o guia propõe uma sistematização conceitual, na qual os principais conceitos trabalhados são formalizados verbalmente e, quando pertinente, associados a expressões matemáticas simplificadas, como a definição do raio de Schwarzschild e a noção de dilatação gravitacional do tempo. Essa etapa busca consolidar a aprendizagem e estabelecer conexões entre o modelo qualitativo e a teoria física subjacente (Hartle, 2003).

O produto educacional também prevê um momento de avaliação formativa, no qual os estudantes são convidados a refletir sobre o que compreenderam, as dificuldades encontradas e as relações estabelecidas entre o análogo e os conceitos da Relatividade Geral. O guia sugere o uso de questões abertas e breves produções escritas como instrumentos para essa avaliação, reforçando o caráter processual da aprendizagem (Black & Wiliam, 1998).

Por fim, o guia didático apresenta orientações ao professor para a adaptação do produto a diferentes contextos escolares, destacando possibilidades de ampliação, simplificação ou integração com outros recursos didáticos, como simulações computacionais e vídeos. Essa flexibilidade reforça o caráter aplicado do produto educacional e sua adequação às diversas realidades do Ensino Médio, contribuindo para a disseminação de práticas inovadoras no ensino de Física Moderna.

3.5 Comitê Ad Hoc

Antes da implementação do produto educacional em sala de aula, o material desenvolvido foi submetido à avaliação de um comitê Ad hoc, constituído especificamente para analisar sua qualidade didática, clareza conceitual e adequação ao contexto do Ensino Médio. O comitê foi composto por cinco professores de Física atuantes no Ensino Médio, sendo três com titulação de mestre e dois especialistas, todos com experiência em ensino de Ciências e familiaridade com metodologias ativas e/ou conteúdos de Física Moderna. A constituição desse comitê teve como finalidade garantir uma análise criteriosa do produto antes de sua aplicação, fortalecendo sua validade pedagógica e científica.

A avaliação realizada pelo comitê considerou aspectos como a coerência entre os objetivos propostos e as atividades sugeridas, a clareza da linguagem utilizada no guia didático, a adequação das estratégias metodológicas ao perfil dos estudantes do Ensino Médio e a consistência conceitual dos conteúdos abordados. Além disso, foram analisados elementos relacionados à organização geral do material, à sequência das aulas, à explicitação das orientações ao professor e à articulação entre o análogo mecânico e o método Peer Instruction. Como defende Plomp (2013), esse tipo de validação prévia é amplamente recomendado em pesquisas de natureza aplicada, especialmente aquelas que envolvem o desenvolvimento de produtos educacionais.

A partir das contribuições do comitê Ad hoc, foram realizadas revisões e aprimoramentos significativos no produto educacional, resultando em uma versão final mais clara, estruturada e funcional. Entre as principais modificações destacam-se a reformulação de algumas expressões e enunciados, com o objetivo de tornar a linguagem mais acessível e precisa; melhorias na estética e na organização visual do material; ajustes na estrutura das aulas propostas; e a inclusão de dicas pedagógicas adicionais ao professor, visando facilitar a mediação didática e antecipar possíveis dificuldades conceituais dos estudantes.

Esse processo de avaliação e revisão contribuiu para elevar a qualidade do produto educacional, assegurando que sua implementação em sala de aula ocorresse de forma mais consistente e alinhada às necessidades reais do contexto escolar. Conforme apontam estudos sobre pesquisa baseada em design, a validação por especialistas constitui uma etapa fundamental para o refinamento de intervenções educacionais, permitindo que o produto final seja, simultaneamente, teoricamente fundamentado e pedagogicamente viável (Plomp, 2013; Reeves, 2006).

3.6 Sequência didática aplicada

A sequência didática aplicada nesta pesquisa está detalhada no Guia Didático do professor e foi estruturada com o objetivo de promover a compreensão conceitual de tópicos fundamentais relacionados à Teoria da Relatividade Geral no Ensino Médio, por meio da articulação entre metodologias ativas, em especial o Peer Instruction, e o uso de um análogo mecânico. A proposta foi organizada em seis aulas sequenciais, planejadas de modo a garantir progressão conceitual, coerência

epistemológica e adequação ao nível cognitivo dos estudantes, conforme orientações da literatura em ensino de Física Moderna (Ostermann & Moreira, 2000; Moreira, 2018). Foi criado um grupo no *WhatsApp* para comunicação direta com cada turma, a partir do qual eram encaminhados os materiais prévios para estudo e discussão posterior em sala de aula.

A Aula 1 teve como objetivo despertar a curiosidade dos estudantes sobre o universo e os fenômenos astronômicos, com ênfase nos buracos negros, além de introduzir a ideia de sua formação. Essa aula foi concebida como um momento de problematização inicial, no qual foram exploradas concepções prévias dos alunos por meio de questionamentos abertos e *Concept Questions* introdutórias, aplicadas segundo a dinâmica do Peer Instruction. A abordagem buscou mobilizar o interesse dos estudantes e criar um contexto significativo para as aulas subsequentes, reconhecendo o papel da motivação e da curiosidade científica no processo de aprendizagem (Ausubel, 2003).

Na Aula 2, os objetivos centraram-se na análise de fenômenos associados aos buracos negros e no reconhecimento de suas características fundamentais, como disco de acreção, horizonte de eventos e singularidade. Nessa etapa, foram aprofundadas discussões conceituais iniciadas na aula anterior, utilizando recursos visuais, vídeos curtos, questões conceituais que exigiam interpretação qualitativa e principalmente o análogo mecânico para representar as características de um buraco negro. O Peer Instruction foi novamente empregado para estimular o confronto de ideias entre os estudantes, favorecendo a explicitação de concepções alternativas e a construção coletiva de significados (Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001).

A Aula 3 teve como foco a revisão do conceito de gravidade segundo a perspectiva newtoniana e a introdução gradual da ideia de espaço-tempo e de sua curvatura causada por massas. Esse momento da sequência foi essencial para estabelecer a transição conceitual entre a Física Clássica e a Relatividade Geral. O professor mediou comparações entre a gravitação como força e a gravitação como manifestação geométrica, preparando o terreno conceitual para a compreensão dos postulados de Einstein. O uso do análogo mecânico foi introduzido de forma preliminar, como suporte visual para essa transição conceitual.

Na Aula 4, os objetivos de aprendizagem concentraram-se na apresentação dos postulados fundamentais da Teoria da Relatividade Geral, em especial o

Princípio da Equivalência e o Princípio da Covariância Geral, bem como na abordagem qualitativa da dilatação do tempo em campos gravitacionais intensos. Nessa aula, o análogo mecânico foi utilizado de forma mais sistemática, auxiliando na visualização da curvatura do espaço-tempo e na representação da dilatação do tempo causada pela gravidade. As discussões foram conduzidas com o apoio de *Concept Questions* cuidadosamente elaborados, permitindo aos estudantes relacionar observações do modelo com conceitos relativísticos abstratos, sempre com a explicitação das limitações da analogia.

A Aula 5 teve como objetivo explorar as características de um buraco negro real e compará-las com aquelas representadas pelo análogo mecânico. Essa etapa foi fundamental para promover uma leitura crítica do modelo utilizado, destacando correspondências e limites entre o análogo e o fenômeno físico real. Os estudantes foram incentivados a analisar até que ponto o modelo permite compreender aspectos como horizonte de eventos e trajetórias de partículas, evitando interpretações literais que pudessem comprometer a compreensão conceitual. Essa problematização é considerada central no uso pedagógico de modelos e analogias no ensino de Ciências (Gilbert, 2004).

Por fim, a Aula 6 foi dedicada à aplicação e à síntese do conhecimento construído ao longo da sequência didática. Nessa etapa, foi aplicado um teste conceitual, com o objetivo de avaliar a compreensão dos estudantes sobre os principais conceitos trabalhados, além da análise em plenária dos diários de bordo, utilizados como instrumento qualitativo de acompanhamento do processo de aprendizagem.

Ao longo de toda a sequência didática, o Peer Instruction foi utilizado como estratégia central de mediação pedagógica, respeitando suas etapas clássicas e utilizando os percentuais de acerto dos estudantes como critério para a tomada de decisões didáticas em tempo real (Mazur, 1997). Essa abordagem favoreceu a participação ativa dos alunos, o desenvolvimento da argumentação científica e a construção de uma aprendizagem conceitual mais sólida.

3.7 Implementação do método Peer Instruction e uso do aplicativo Plickers

A implementação do método Peer Instruction (PI) nesta pesquisa teve como objetivo central promover a aprendizagem conceitual dos estudantes, estimulando a reflexão individual, a argumentação entre pares e a reconstrução coletiva do

conhecimento. O método foi aplicado de forma sistemática ao longo da sequência didática, integrando-se ao uso do análogo mecânico de buracos negros e às discussões conceituais sobre a Teoria da Relatividade Geral. Essa abordagem está alinhada à proposta original de Mazur (1997), que defende a centralidade da interação social no processo de aprendizagem em Física.

Em cada aula da sequência didática, o Peer Instruction foi estruturado seguindo suas etapas clássicas: apresentação de uma questão conceitual (*Concept Question*), resposta individual, discussão entre pares, nova resposta e intervenção mediadora do professor. As questões foram elaboradas de modo a priorizar a interpretação conceitual, evitando cálculos algorítmicos, e buscando explorar concepções alternativas comuns relacionadas à gravitação, espaço-tempo e buracos negros. Essa escolha metodológica fundamenta-se em estudos que apontam a eficácia do PI na superação de dificuldades conceituais persistentes no ensino de Física (Crouch & Mazur, 2001; Freeman et al., 2014).

Para a coleta das respostas dos estudantes durante as votações individuais e coletivas foi utilizado o aplicativo Plickers, uma ferramenta digital gratuita que permite registrar respostas em tempo real por meio de cartões impressos com códigos específicos. Cada estudante recebeu um cartão individual, associado previamente ao seu perfil no aplicativo, possibilitando a identificação das respostas sem a necessidade de dispositivos móveis por parte dos alunos. Essa característica mostrou-se especialmente adequada ao contexto escolar da pesquisa, marcado por acesso limitado a tecnologias digitais pessoais.

O uso do Plickers contribuiu para tornar o processo de votação mais ágil e organizado, permitindo ao professor visualizar instantaneamente a distribuição das respostas da turma. Essa visualização imediata foi fundamental para a tomada de decisões pedagógicas durante a aula, especialmente no que se refere à necessidade de promover discussões adicionais, reformular explicações ou avançar para novas questões. Segundo Mazur (1997), a análise dos percentuais de acerto é um elemento-chave para a eficácia do Peer Instruction.

Figura 7: Uso do app Plickers na sala para coletar as respostas dos alunos



Fonte: O Autor

Os percentuais de respostas corretas obtidos na primeira votação orientaram a condução das aulas. Quando o percentual de acertos se situava abaixo de aproximadamente 30%, o professor optava por retomar o conceito de forma mais detalhada, oferecendo novas explicações ou exemplos. Em situações em que o percentual variava entre 30% e 70%, os estudantes eram incentivados a discutir suas respostas com os colegas, conforme recomendado na metodologia do PI. Percentuais superiores a 70% indicavam compreensão satisfatória, permitindo o avanço da sequência didática (Mazur, 1997).

Durante as discussões entre pares, o papel do professor foi predominantemente o de mediador, observando as interações, ouvindo argumentos e intervindo pontualmente quando necessário. Essa postura favoreceu um ambiente de aprendizagem colaborativa, no qual os estudantes se sentiram mais à vontade para expor dúvidas e confrontar ideias divergentes. Estudos como os de Vygotsky (2008) e Freeman et al. (2014) indicam que esse tipo de interação contribui significativamente para o desenvolvimento da argumentação científica e para a aprendizagem significativa.

Figura 8: Momento Discussão em pares após a média de acertos ser entre 30% e 70%.

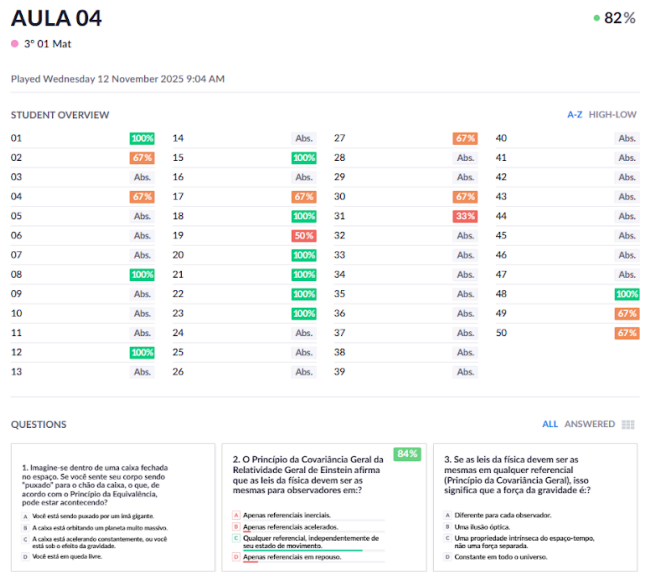


Fonte: O Autor

A segunda votação, realizada após as discussões em grupo, permitiu avaliar possíveis mudanças nas concepções dos estudantes. Em muitos casos, observou-se um aumento significativo no percentual de respostas corretas, evidenciando o papel da interação social na reconstrução conceitual. Esses resultados corroboram achados da literatura que apontam ganhos conceituais expressivos associados ao uso do Peer Instruction, mesmo em conteúdos abstratos (Crouch & Mazur, 2001).

O Plickers também possibilitou o armazenamento dos dados coletados ao longo das aulas, gerando relatórios que foram posteriormente utilizados na análise quantitativa da pesquisa. Esses registros permitiram acompanhar a evolução das respostas dos estudantes ao longo da sequência didática, contribuindo para a análise dos ganhos conceituais e para a triangulação com outros instrumentos de coleta de dados, como testes conceituais e diários de bordo.

Figura 9: Relatório das Concepts Questions no Plickers



Fonte: O Autor

Outro aspecto relevante da implementação do Peer Instruction foi sua integração com o uso do análogo mecânico. As questões conceituais frequentemente faziam referência direta às observações realizadas no modelo, incentivando os estudantes a estabelecer relações entre a representação física e os conceitos teóricos discutidos. Essa articulação potencializou o uso do análogo, transformando-o em um elemento ativo do processo de aprendizagem, e não apenas em um recurso ilustrativo.

Figura 10: Uso do análogo para explicação das características de um buraco negro e os efeitos da gravidade como a curvatura do espaço-tempo e a dilatação temporal.



Fonte: O Autor

Por fim, a implementação do Peer Instruction mostrou-se uma estratégia viável e eficaz no contexto do Ensino Médio, mesmo em ambientes com restrições tecnológicas. A combinação entre metodologia ativa, recurso digital simples e mediação docente contribuiu para aumentar a participação dos estudantes, favorecer a aprendizagem conceitual e fornecer dados consistentes para a análise da pesquisa, reforçando a pertinência da proposta desenvolvida neste trabalho.

3.8 Instrumentos de coleta de dados

A coleta de dados desta pesquisa foi realizada por meio de diferentes instrumentos, selecionados de forma a contemplar tanto aspectos quantitativos quanto qualitativos do processo de ensino e aprendizagem. De acordo com Creswell (2014), essa opção metodológica fundamenta-se na necessidade de obter uma compreensão mais abrangente dos efeitos da intervenção pedagógica, conforme recomendam estudos sobre pesquisas educacionais de abordagem mista.

Um dos instrumentos utilizados foi um questionário (apêndices 1 e 2) aplicado antes e após a intervenção didática, com o objetivo de avaliar a percepção dos estudantes acerca do uso do método Peer Instruction, do análogo mecânico e da sequência didática como um todo. Esse instrumento buscou captar aspectos relacionados ao engajamento, à clareza das explicações, à participação em sala de aula e à contribuição das atividades para a compreensão dos conceitos trabalhados.

O questionário foi estruturado com base na escala Likert (Likert, 1932; Jamieson, 2004) composta por afirmações avaliadas em níveis graduais de concordância. A escolha dessa escala justifica-se por sua ampla utilização em pesquisas educacionais voltadas à análise de atitudes, percepções e opiniões, permitindo a quantificação de dados subjetivos de forma sistemática.

A aplicação do questionário em dois momentos distintos (pré e pós-intervenção) possibilitou a comparação das percepções dos estudantes antes e após a implementação da proposta pedagógica. Essa estratégia permitiu identificar possíveis mudanças na forma como os alunos avaliavam o processo de ensino-aprendizagem, contribuindo para uma análise mais consistente da intervenção enquanto prática educacional. Além do questionário de percepção, foi aplicado um teste conceitual (anexo) antes e após a sequência didática, com o objetivo de avaliar a aprendizagem dos conceitos relacionados aos buracos negros e à Teoria da Relatividade Geral. O teste foi composto por seis questões objetivas e

quatro questões dissertativas, elaboradas de modo a contemplar diferentes níveis de complexidade cognitiva.

As questões objetivas foram formuladas com foco na identificação de concepções conceituais corretas e incorretas, seguindo o modelo de questões conceituais amplamente utilizado no Peer Instruction. Já as questões dissertativas tiveram como finalidade analisar a capacidade dos estudantes de articular ideias, justificar respostas e estabelecer relações entre conceitos, permitindo uma avaliação mais aprofundada da compreensão conceitual.

A aplicação do teste conceitual em formato pré e pós-intervenção possibilitou o cálculo do ganho normalizado de Hake, indicador amplamente utilizado para mensurar a efetividade de intervenções pedagógicas no ensino de Física (Hake, 1998). Esse índice permite comparar o aprendizado efetivamente alcançado pelos estudantes em relação ao máximo possível, fornecendo uma medida quantitativa robusta dos ganhos conceituais.

$$g = \frac{\text{Pontuação do PósTeste} - \text{Pontuação no PréTeste}}{\text{Pontuação Máxima Possível} - \text{Pontuação no PréTeste}} \quad 3.8.1$$

O uso do ganho normalizado mostrou-se particularmente relevante neste estudo, uma vez que o foco da intervenção esteve na aprendizagem conceitual, e não na resolução algorítmica de problemas. Pesquisas indicam que metodologias ativas, como o Peer Instruction, tendem a produzir ganhos normalizados superiores aos observados em abordagens tradicionais (Hake, 1998; Freeman et al., 2014).

Como instrumento complementar de coleta de dados qualitativos, os estudantes utilizaram um diário de bordo (anexo), no qual registraram, ao final de cada aula, suas impressões, dificuldades, compreensões e pontos considerados mais relevantes. O diário de bordo foi concebido como um espaço de reflexão individual, incentivando os estudantes a sistematizarem o que foi aprendido e a expressarem suas percepções sobre as atividades desenvolvidas.

O uso de diários de bordo em pesquisas educacionais é amplamente reconhecido como uma estratégia eficaz para acessar processos cognitivos e metacognitivos dos estudantes, permitindo compreender não apenas o que foi aprendido, mas como a aprendizagem ocorreu (Zabalza, 2004). Nesse sentido, os registros escritos forneceram subsídios importantes para a análise qualitativa dos dados.

A triangulação entre os dados provenientes dos questionários, dos testes conceituais e dos diários de bordo contribuiu para aumentar a confiabilidade dos resultados da pesquisa. A utilização de múltiplos instrumentos possibilitou confrontar diferentes fontes de evidência, reduzindo vieses e fortalecendo as conclusões obtidas (Creswell, 2014). Por fim, os instrumentos de coleta de dados foram concebidos de forma articulada aos objetivos da pesquisa, assegurando coerência entre a proposta pedagógica, os procedimentos metodológicos e a análise dos resultados. Essa integração reforça o caráter sistemático da investigação e contribui para uma avaliação mais consistente da contribuição do produto educacional e da metodologia adotada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização geral dos dados coletados

A intervenção didática foi realizada com estudantes da terceira série do Ensino Médio, distribuídos em duas turmas regulares, uma do turno matutino e outra do turno vespertino, conforme descrito no Capítulo 3. Ao todo, participaram da pesquisa 40 estudantes, todos com faixa etária predominante entre 17 e 18 anos. Ressalta-se que apenas os estudantes que participaram integralmente das etapas pré e pós-intervenção tiveram seus dados considerados na análise, visando garantir consistência estatística e comparabilidade dos resultados (Lakatos & Marconi, 2017).

Para a coleta de dados, foram utilizados múltiplos instrumentos, de natureza quantitativa e qualitativa, permitindo uma análise mais abrangente do impacto da intervenção pedagógica. Os instrumentos empregados foram: (i) um questionário pré e pós-intervenção, estruturado a partir da escala Likert, com o objetivo de investigar percepções dos estudantes sobre a metodologia utilizada; (ii) um teste conceitual aplicado antes e após a intervenção, composto por questões objetivas e dissertativas; e (iii) diários de bordo estruturado para os estudantes utilizarem ao longo da sequência didática.

O questionário baseado na escala Likert foi estruturado em 15 afirmações, organizadas em categorias relacionadas à participação dos estudantes, compreensão conceitual, interesse pelos conteúdos abordados e percepção sobre o uso do análogo físico e da metodologia Peer Instruction. As respostas foram organizadas em uma escala de concordância entre: “Discordo totalmente”, “Discordo”, “Nem concordo, nem discordo”, “Concordo” e “Concordo totalmente”,

conforme recomendações da literatura especializada (Likert, 1932; Boone & Boone, 2012).

O teste conceitual, por sua vez, foi composto por 10 questões, sendo 6 questões objetivas de múltipla escolha e 4 questões dissertativas, elaboradas com base nos conceitos centrais de Relatividade Geral tais como curvatura do espaço-tempo, dilatação temporal e características fundamentais dos buracos negros. Esse instrumento teve como finalidade avaliar a aprendizagem conceitual dos estudantes e possibilitar o cálculo do ganho normalizado de Hake, amplamente utilizado em pesquisas em ensino de Física para mensurar o impacto de intervenções pedagógicas (Hake, 1998).

Os diários de bordo constituíram uma importante fonte de dados qualitativos, permitindo acessar percepções individuais dos estudantes ao longo das aulas. Em cada encontro, os alunos foram orientados a registrar os principais conceitos discutidos, suas dúvidas, impressões sobre as atividades desenvolvidas e relações estabelecidas com conhecimentos prévios. Para fins de análise, foram considerados 20 diários, selecionados de acordo com critérios de completude e regularidade dos registros.

No que se refere à organização dos dados, os resultados quantitativos provenientes dos questionários e dos testes conceituais foram tabulados em planilhas eletrônicas e posteriormente organizados em tabelas e gráficos, apresentados nas seções seguintes. Já os dados qualitativos oriundos dos diários de bordo foram analisados por meio de categorização temática, buscando identificar padrões recorrentes e evidências de aprendizagem conceitual, conforme procedimentos descritos por Bardin (2016).

Cabe destacar que, ao longo da coleta de dados, foram observados os princípios éticos da pesquisa em educação, garantindo-se o anonimato dos participantes e o uso dos dados exclusivamente para fins acadêmicos. A participação dos estudantes ocorreu de forma voluntária, mediante autorização prévia da instituição e dos responsáveis legais, quando aplicável, em conformidade com as diretrizes nacionais para pesquisas com seres humanos (Brasil, 2016).

Assim, a caracterização apresentada nesta seção estabelece as bases para a análise detalhada dos resultados, permitindo que os dados quantitativos e qualitativos sejam interpretados de forma integrada e coerente com os objetivos da pesquisa. Nas seções seguintes, esses dados serão explorados de maneira

aprofundada, buscando evidenciar os impactos da metodologia Peer Instruction associada ao uso de um análogo mecânico no ensino de conceitos de Relatividade Geral no Ensino Médio.

4.2 Resultados do teste conceitual

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir do teste conceitual aplicado antes e após a intervenção pedagógica, com o objetivo de avaliar a aprendizagem dos estudantes em relação aos conceitos abordados na sequência didática. O teste foi elaborado de modo a contemplar tanto aspectos conceituais fundamentais quanto a capacidade de argumentação dos estudantes, sendo composto por seis questões objetivas de múltipla escolha e quatro questões dissertativas, conforme descrito na Seção 3.7.

A aplicação do teste conceitual em dois momentos distintos (pré-intervenção e pós-intervenção) permitiu identificar o nível inicial de compreensão dos estudantes e as possíveis mudanças decorrentes da utilização da metodologia Peer Instruction associada ao uso do análogo mecânico. Participaram efetivamente dessa etapa 40 estudantes, cujos resultados foram analisados de forma comparativa.

No que se refere às questões objetivas, os resultados do teste pré-intervenção indicaram um desempenho médio de 27,9%, evidenciando dificuldades conceituais significativas relacionadas a temas como os postulados da relatividade geral, formação de buracos negros e noções iniciais de curvatura do espaço-tempo. Observou-se que muitas respostas corretas apresentavam indícios de acerto por reconhecimento superficial, sem necessariamente refletir uma compreensão conceitual consistente, fenômeno amplamente discutido na literatura sobre ensino de Física (Hestenes, Wells & Swackhamer, 1992).

Após a intervenção pedagógica, o desempenho médio nas questões objetivas elevou-se para 71,4%, representando um aumento absoluto de 43,5% pontos percentuais em relação ao teste inicial. Esse resultado sugere uma melhora significativa na compreensão conceitual dos estudantes, especialmente em questões que exigiam interpretação qualitativa de fenômenos físicos, e não apenas a aplicação de procedimentos algorítmicos.

A análise individual das questões objetivas revelou que os maiores ganhos ocorreram nas questões relacionadas à definição de gravidade como sendo a curvatura do espaço-tempo e horizonte de eventos de um buraco negro, conteúdos

diretamente explorados por meio das discussões em pares e do uso do análogo físico. Esse resultado é consistente com estudos como Hake (1998) e Crouch & Mazur (2001) que apontam que metodologias de engajamento interativo favorecem a reconstrução conceitual em tópicos abstratos da Física.

Tabela 1: Média das notas no Pré e Pós-Teste bem como o ganho normalizado de cada aluno.

Aluno	Pré-Teste	Pós-Teste	Ganho real	<g>	%<g>
A	0	80	80	0,80	80
B	0	40	40	0,40	40
C	0	30	30	0,30	30
D	10	70	60	0,67	67
E	10	40	30	0,33	33
F	15	50	35	0,41	41
G	20	80	60	0,75	75
H	20	25	5	0,06	6
I	20	50	30	0,38	38
J	20	85	65	0,81	81
K	20	60	40	0,50	50
L	20	70	50	0,63	63
M	20	90	70	0,88	88
N	20	50	30	0,38	38
O	24	65	41	0,54	54
P	24	85	61	0,80	80
Q	24	95	71	0,93	93
R	24	100	76	1,00	100
S	30	45	15	0,21	21
T	30	80	50	0,71	71
A'	30	40	10	0,14	14
B'	30	95	65	0,93	93
C'	30	80	50	0,71	71
D'	30	100	70	1,00	100
E'	30	80	50	0,71	71
F'	30	90	60	0,86	86
G'	30	100	70	1,00	100
H'	30	50	20	0,29	29
I'	32	60	28	0,41	41
J'	32	70	38	0,56	56

K'	35	70	35	0,54	54
L'	40	100	60	1,00	100
M'	40	70	30	0,50	50
N'	40	80	40	0,67	67
O'	40	70	30	0,50	50
P'	50	75	25	0,50	50
Q'	50	80	30	0,60	60
R'	50	75	25	0,50	50
S	50	90	40	0,80	80
T'	65	90	25	0,71	71
Média da turma	27,9	71,4			
g < 30%	4 alunos				
30% <g> 70%	19 alunos				
g > 70%	17 alunos				

Fonte: O Autor

A tabela de resultados do pré e do pós-teste evidencia um deslocamento consistente de desempenho após a intervenção didática, quando analisada pelo critério do ganho normalizado de Hake. Observa-se que, partindo de médias iniciais relativamente baixas no pré-teste, os estudantes alcançaram notas substancialmente superiores no pós-teste, o que se reflete em ganhos reais positivos para praticamente todos os participantes. A própria planilha sintetiza esse comportamento ao apresentar a média da turma com crescimento expressivo entre os dois momentos avaliativos, além da classificação dos ganhos normalizados em faixas ($g < 30\%$, $30\% < g < 70\%$ e $g > 70\%$).

Esse padrão é coerente com a literatura que utiliza o ganho normalizado como indicador de efetividade de metodologias interativas, pois ele controla o “teto” de aprendizagem possível e permite comparar turmas com níveis iniciais distintos.

Ao examinar os valores individuais, nota-se uma heterogeneidade de trajetórias, com estudantes apresentando ganhos baixos, médios e altos. Ainda assim, predomina a concentração de resultados nas faixas média ($30\% < g < 70\%$) e alta ($g > 70\%$), o que sugere que a intervenção beneficiou não apenas os alunos com maior desempenho inicial, mas também aqueles que partiram de patamares mais baixos. Há casos em que o ganho normalizado se aproxima, ou foi, de 1,00 (ou

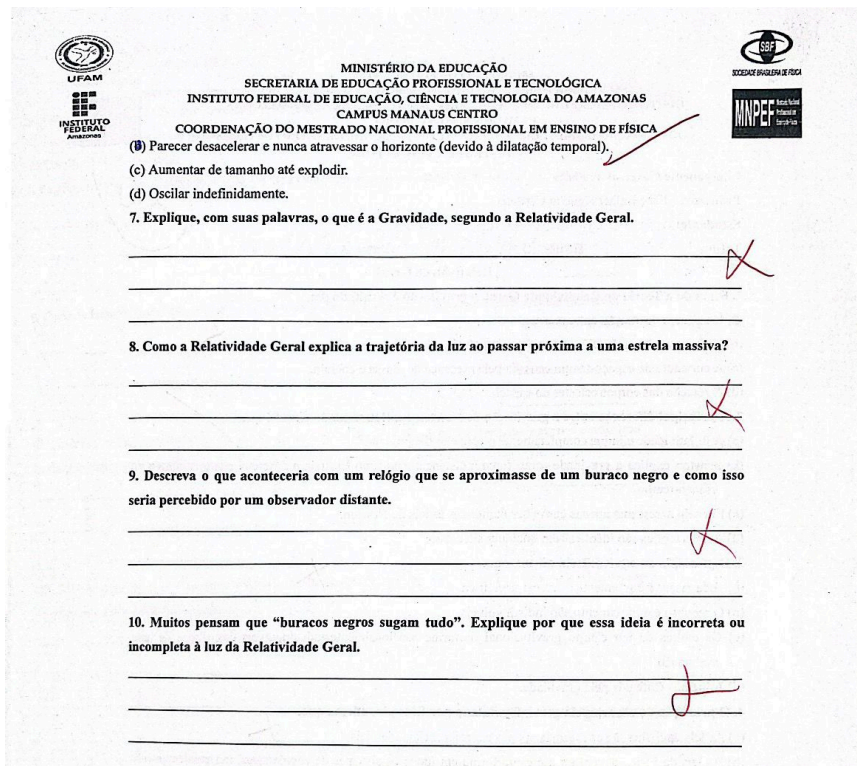
100%), indicando que esses estudantes praticamente atingiram o máximo de progresso possível dado o ponto de partida no pré-teste, conforme registrado na própria tabela. Esse comportamento é particularmente relevante, pois aponta para uma aprendizagem conceitual efetiva, e não apenas para flutuações pontuais de desempenho.

Quando se considera a distribuição por faixas de Hake, a presença majoritária de estudantes nas categorias de ganho médio e alto é um indício robusto de que a sequência didática promoveu mudanças conceituais significativas. Em termos interpretativos, ganhos baixos ($g < 30\%$) costumam estar associados a abordagens tradicionais centradas na transmissão, enquanto ganhos médios e altos são característicos de estratégias interativas e centradas no estudante. A própria síntese apresentada ao final da planilha, que separa os percentuais de alunos em cada faixa, reforça essa leitura ao mostrar que a maior parte da turma ultrapassa o limiar de 30% de ganho normalizado. Assim, os dados empíricos sustentam a hipótese de que a intervenção teve impacto pedagógico relevante.

Assim, a análise conjunta do ganho real e do ganho normalizado permite uma interpretação mais fina dos resultados. Enquanto o ganho real mostra o aumento absoluto de pontos entre pré e pós-teste, o ganho normalizado explicita quão eficiente foi esse aumento em relação ao máximo possível para cada estudante. O fato de muitos alunos apresentarem valores de g superiores a 0,5 indica uma eficiência instrucional elevada, compatível com intervenções que promovem discussão, confronto de ideias e reorganização conceitual. Portanto, a tabela não apenas documenta uma melhora quantitativa no desempenho, mas também oferece evidências de aprendizagem conceitual substantiva, em consonância com os critérios propostos por Hake para avaliar metodologias de ensino interativas.

No que diz respeito às questões dissertativas, o teste pré-intervenção evidenciou respostas predominantemente “em branco”. Em alguns casos, os estudantes demonstraram dificuldade em articular explicações coerentes sobre os fenômenos estudados, mesmo quando apresentavam noções intuitivas corretas.

Figura 11: Questões dissertativas no pré-teste a qual a maioria dos alunos não respondiam.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAZONAS
CAMPUS MANAUS CENTRO
COORDENAÇÃO DO MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

(b) Parecer desacelerar e nunca atravessar o horizonte (devido à dilatação temporal).
(c) Aumentar de tamanho até explodir.
(d) Oscilar indefinidamente.

7. Explique, com suas palavras, o que é a Gravidade, segundo a Relatividade Geral.

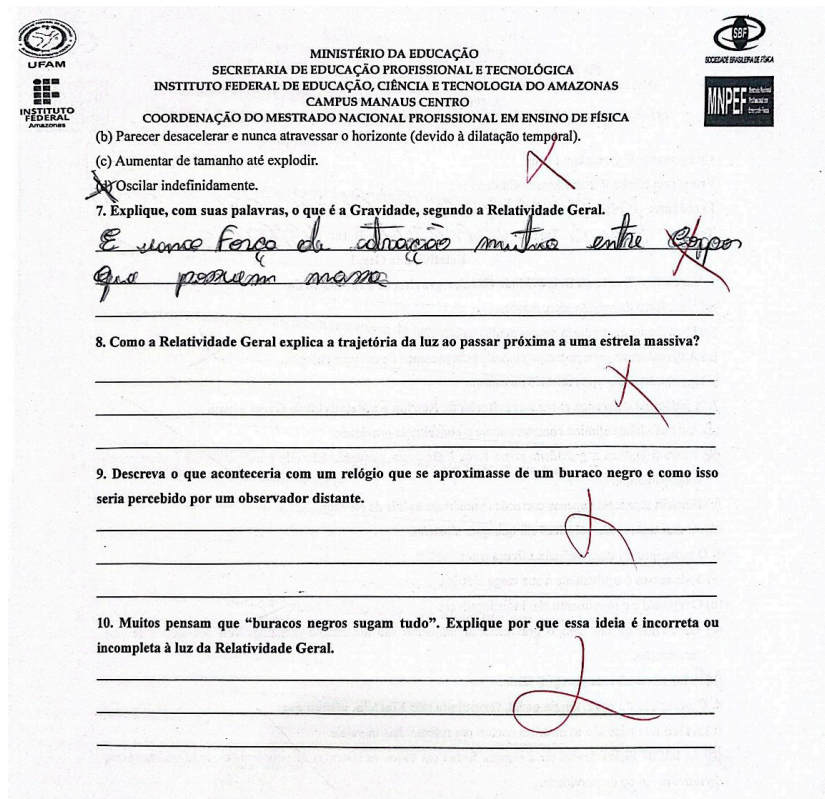
8. Como a Relatividade Geral explica a trajetória da luz ao passar próxima a uma estrela massiva?

9. Descreva o que aconteceria com um relógio que se aproximasse de um buraco negro e como isso seria percebido por um observador distante.

10. Muitos pensam que "buracos negros sugam tudo". Explique por que essa ideia é incorreta ou incompleta à luz da Relatividade Geral.

Fonte: Próprio autor

Figura 12: Questões dissertativas no pré-teste a qual alguns alunos não conseguiam responder com certeza.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAZONAS
CAMPUS MANAUS CENTRO
COORDENAÇÃO DO MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

(b) Parecer desacelerar e nunca atravessar o horizonte (devido à dilatação temporal).
(c) Aumentar de tamanho até explodir.
(d) Oscilar indefinidamente.

7. Explique, com suas palavras, o que é a Gravidade, segundo a Relatividade Geral.

E nasce força de atração mutua entre corpos que possuem massa

8. Como a Relatividade Geral explica a trajetória da luz ao passar próxima a uma estrela massiva?

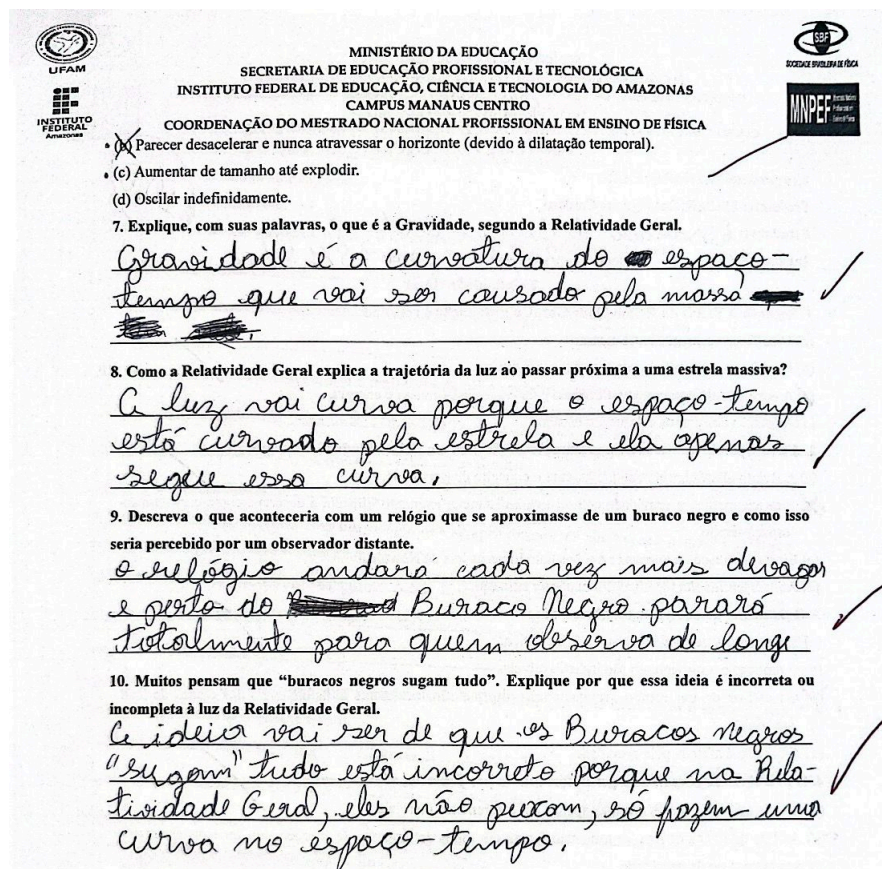
9. Descreva o que aconteceria com um relógio que se aproximasse de um buraco negro e como isso seria percebido por um observador distante.

10. Muitos pensam que "buracos negros sugam tudo". Explique por que essa ideia é incorreta ou incompleta à luz da Relatividade Geral.

Fonte: Próprio autor

No teste pós-intervenção, observou-se uma evolução qualitativa nas respostas dissertativas. Os estudantes passaram a empregar com maior frequência conceitos como “gravidade não é uma força”, “presença de massa deforma o espaço-tempo” e “o tempo desacelera próximo de gravidade intensa”, além de estabelecer relações mais claras entre gravitação, curvatura do espaço-tempo e formação de buracos negros. A presença de argumentos mais estruturados e o uso de exemplos discutidos em sala indicam avanços não apenas no domínio conceitual, mas também na capacidade de comunicação científica.

Figura 13: Questões dissertativas no pós-teste a qual a maioria dos alunos conseguiram explicar os fenômenos relacionados.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAZONAS
CAMPUS MANAUS CENTRO
COORDENAÇÃO DO MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

UFAM

INSTITUTO FEDERAL Amazonas

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
MNPET

(X) Parecer desacelerar e nunca atravessar o horizonte (devido à dilatação temporal).
(c) Aumentar de tamanho até explodir.
(d) Oscilar indefinidamente.

7. Explique, com suas palavras, o que é a Gravidade, segundo a Relatividade Geral.

Gravidade é a curvatura do espaço-tempo que vai ser causada pela massa.

8. Como a Relatividade Geral explica a trajetória da luz ao passar próxima a uma estrela massiva?

A luz vai curva porque o espaço-tempo está curvado pela estrela e ela apenas segue essa curva.

9. Descreva o que aconteceria com um relógio que se aproximasse de um buraco negro e como isso seria percebido por um observador distante.

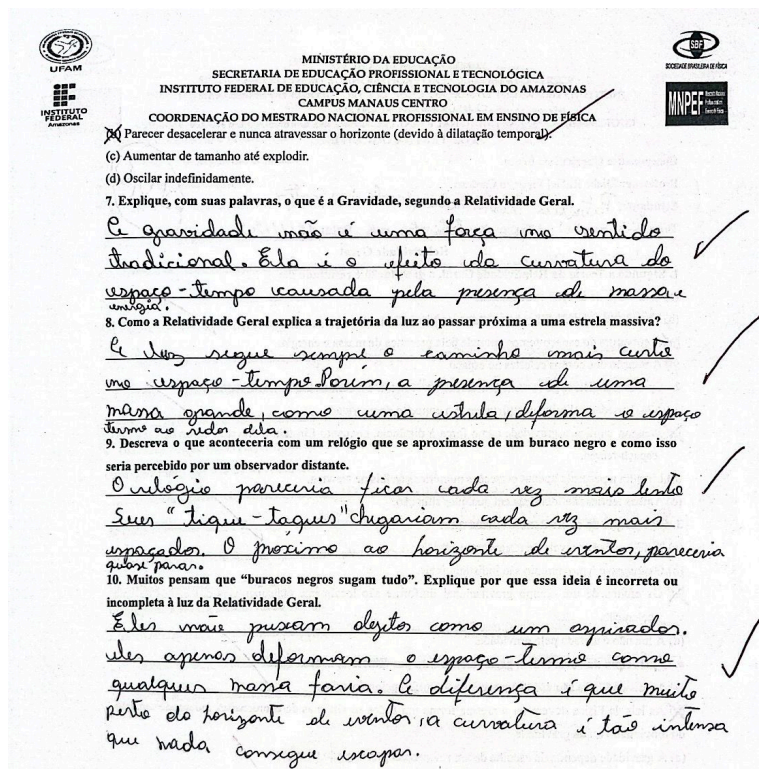
O relógio andaria cada vez mais devagar e perto do Buraco Negro parará totalmente para quem observa de longe.

10. Muitos pensam que “buracos negros sugam tudo”. Explique por que essa ideia é incorreta ou incompleta à luz da Relatividade Geral.

A ideia vai ser de que os Buracos negros “sugam” tudo está incorreto porque na Relatividade Geral, eles não sugam, só fazem uma curva no espaço-tempo.

Fonte: Próprio autor

Figura 14: Questões dissertativas no pós-teste a qual a maioria dos alunos conseguiram explicar os fenômenos relacionados.



Fonte: Próprio autor

A comparação entre os testes pré e pós-intervenção revelou ainda uma redução significativa de respostas em branco ou incompletas nas questões dissertativas, passando de 84% para 42%. Esse dado sugere um aumento na confiança dos estudantes para expressar suas ideias, aspecto frequentemente associado a ambientes de aprendizagem que valorizam a participação ativa e o diálogo entre pares (Mazur, 1997; Freeman et al., 2014). Desse modo, os resultados obtidos corroboram achados da literatura que indicam que intervenções baseadas em metodologias ativas tendem a promover ganhos conceituais mais expressivos quando comparadas a abordagens tradicionais, especialmente em conteúdos que exigem mudanças profundas de paradigma conceitual, como os temas de Física Moderna (Hake, 1998; Araújo et al., 2017).

Por fim, destaca-se que os dados apresentados nesta seção fornecem subsídios quantitativos e qualitativos para o cálculo do ganho normalizado de Hake, que será discutido de forma específica na próxima seção. A análise desse indicador permitirá avaliar de maneira mais precisa a efetividade da intervenção pedagógica, situando os resultados obtidos no contexto de pesquisas consolidadas na área de Ensino de Física.

4.3 Análise do ganho normalizado de Hake

A análise do ganho normalizado de Hake constitui um dos principais referenciais quantitativos para avaliar a efetividade de intervenções pedagógicas no ensino de Física, sobretudo quando se busca comparar resultados obtidos por metodologias distintas a partir de níveis iniciais de conhecimento diferentes (Hake, 1998). Nesse sentido, o uso desse indicador permite uma interpretação holística dos resultados do teste conceitual aplicado antes e após a intervenção descrita neste trabalho.

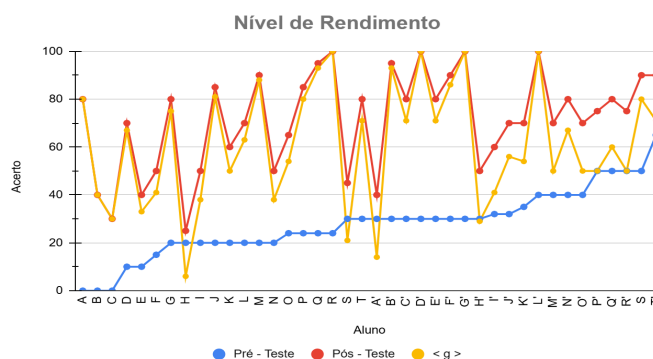
O ganho normalizado, representado por g , é definido como a razão entre o ganho efetivamente obtido pelos estudantes e o ganho máximo possível, sendo calculado a partir da média percentual de acertos no pré-teste e no pós-teste. Matematicamente, esse ganho é expresso por:

$$g = \frac{\langle pós \rangle - \langle pré \rangle}{100 - \langle pré \rangle} \quad 4.3.1$$

onde $\langle pré \rangle$ corresponde à média de acertos no teste pré-intervenção e $\langle pós \rangle$ à média de acertos no teste pós-intervenção (Hake, 1998). Essa formulação torna o índice sensível às mudanças reais de aprendizagem, evitando superestimações associadas apenas ao desempenho final.

No presente estudo, a média de acertos no teste conceitual pré-intervenção foi de 27,9%, indicando um nível inicial de compreensão conceitual considerado baixo. Após a intervenção pedagógica, a média de acertos no pós-teste elevou-se para 71,4%, o que resultou em um ganho normalizado de $g = 60\%$.

Gráfico 1: Rendimento dos alunos

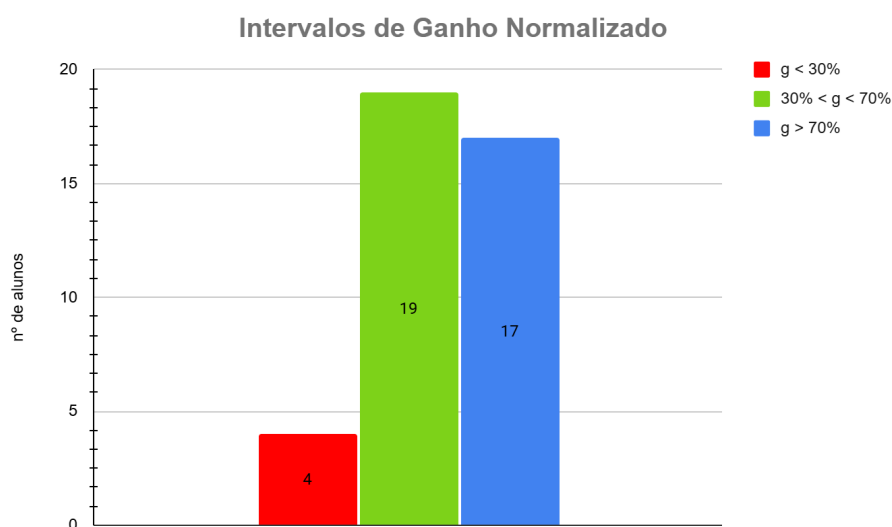


Fonte: O Autor

De acordo com a classificação proposta por Hake (1998), os valores de ganho normalizado podem ser organizados em três intervalos interpretativos: ganhos baixos $g < 30\%$, ganhos médios $30\% < g < 70\%$ e ganhos altos $g > 70\%$. Cada um desses intervalos está associado a diferentes níveis de efetividade pedagógica e possui implicações importantes para a análise dos resultados.

Ganhos classificados como baixos são frequentemente associados a metodologias tradicionais de ensino, centradas na exposição verbal do professor e na resolução mecânica de exercícios (Hake, 1998). Nesse contexto, mesmo quando há melhora no desempenho pós-teste, ela tende a ser limitada, refletindo aprendizagens superficiais e pouco duradouras. Caso os dados desta pesquisa indicassem um ganho nessa faixa, isso sugeriria que a intervenção teve impacto restrito sobre a compreensão conceitual dos estudantes.

Gráfico 2: Quantidade de alunos em cada intervalo



Fonte: O Autor

Contudo, os resultados obtidos neste estudo apontam para um ganho normalizado de 60%, que se enquadra no intervalo de ganho médio. Ganhos médios, segundo Hake (1998), são característicos de abordagens que promovem engajamento interativo, ainda que não explorem plenamente estratégias de confronto conceitual ou discussão entre pares de forma sistemática.

O intervalo de ganho médio é amplamente relatado em estudos que utilizam metodologias ativas bem estruturadas, como o Peer Instruction, a aprendizagem

baseada em problemas e o uso de testes conceituais com feedback imediato (Crouch & Mazur, 2001; Freeman et al., 2014). Assim, a obtenção de um ganho nessa faixa indica que a intervenção foi capaz de promover mudanças conceituais relevantes, superando significativamente os resultados típicos de métodos tradicionais.

Quando analisado à luz do contexto específico desta pesquisa, ensino de tópicos de Física Moderna e Relatividade Geral no Ensino Médio, um ganho médio assume especial relevância. Esses conteúdos envolvem elevado grau de abstração e ruptura conceitual, o que historicamente dificulta a obtenção de ganhos elevados em avaliações conceituais (Ostermann & Moreira, 2000). Portanto, resultados nessa faixa reforçam a adequação da metodologia adotada. Ganhos classificados como altos são menos frequentes na literatura e estão geralmente associados a intervenções altamente estruturadas, com forte ênfase na discussão conceitual, no feedback imediato e na confrontação explícita de concepções alternativas (Hake, 1998; Mazur, 1997).

A análise desagregada dos dados permitiu ainda verificar diferenças no ganho normalizado entre as turmas do turno matutino e vespertino. A turma matutino apresentou um ganho de $g = 60\%$, enquanto a turma vespertino alcançou um ganho de $g = 61\%$. Essa pequena diferença pode estar relacionada a fatores contextuais, como perfil dos estudantes, dinâmica das aulas e níveis de engajamento durante as discussões em pares.

Os resultados obtidos estão em consonância com estudos nacionais que aplicaram o Peer Instruction no Ensino Médio e relataram ganhos normalizados médios e altos, mesmo em contextos escolares diversos (Araújo et al., 2017; Ramalho, 2019). Isso reforça a confiabilidade e relevância da metodologia e sua aplicabilidade em diferentes realidades educacionais. Ao mesmo tempo, é importante destacar que o ganho normalizado, embora seja um indicador poderoso, não esgota a análise da aprendizagem. Ele deve ser interpretado em conjunto com outros instrumentos, como os questionários de percepção e os diários de bordo, que fornecem evidências qualitativas complementares sobre o processo de aprendizagem.

Nesse sentido, os valores de ganho obtidos nesta pesquisa não apenas indicam melhora no desempenho conceitual, mas também corroboram os resultados qualitativos apresentados nas seções subsequentes, especialmente no que diz

respeito ao aumento do engajamento, da participação ativa e da capacidade de argumentação dos estudantes. Assim, a análise do ganho normalizado de Hake evidencia que a intervenção pedagógica proposta foi capaz de promover aprendizagens conceituais significativas, situando-se nos intervalos de ganho associados a metodologias de engajamento interativo. Esses resultados reforçam o potencial do Peer Instruction aliado ao uso de análogos físicos como estratégia viável para o ensino de conteúdos desafiadores da Física Moderna no Ensino Médio.

4.4 Resultados dos questionários pré e pós-intervenção

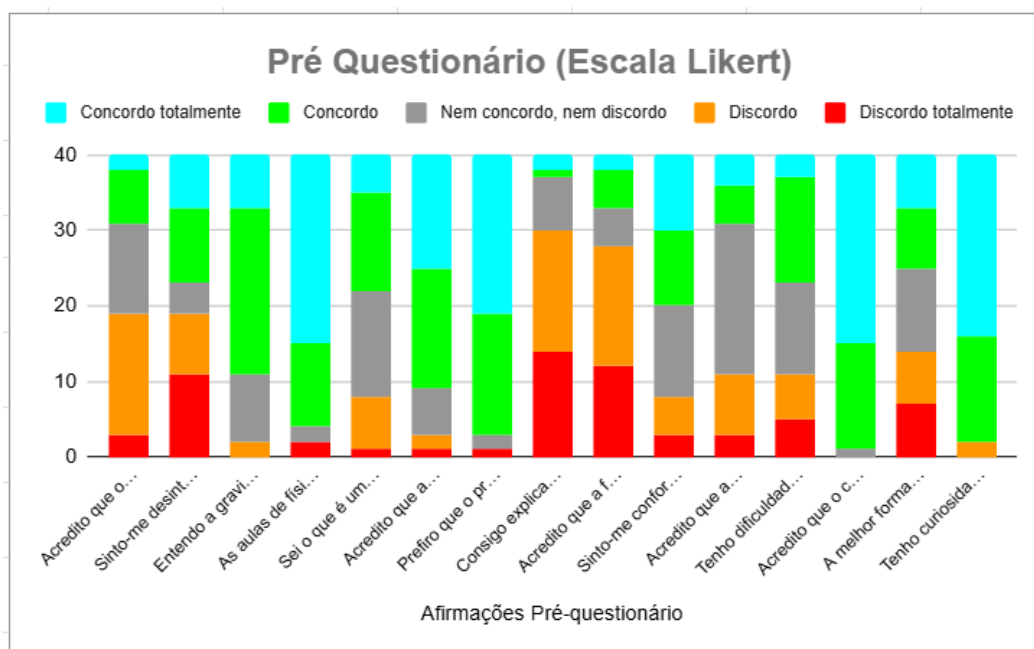
Com o objetivo de analisar as percepções dos estudantes acerca da metodologia utilizada e da intervenção pedagógica como um todo, foram aplicados questionários antes e após a sequência didática, estruturados a partir da escala Likert. Esse instrumento permitiu avaliar aspectos atitudinais e perceptivos relacionados ao ensino de Física, ao uso do método Peer Instruction, ao análogo mecânico e ao próprio envolvimento dos estudantes durante as aulas.

A escala Likert utilizada contemplou 15 itens (pré) e 14 (pós), organizados em afirmações às quais os estudantes deveriam atribuir níveis de concordância, variando entre “discordo totalmente”, “discordo”, “nem concordo, nem discordo”, “concordo” e “concordo totalmente”. Participaram dessa etapa 40 estudantes, correspondendo a 100% do total de alunos envolvidos na intervenção.

4.4.1 Pré-intervenção

No questionário pré-intervenção, os resultados indicaram uma percepção inicial predominantemente pouco positiva dos estudantes em relação ao ensino de Física. Itens associados ao interesse pela disciplina e à compreensão de conceitos abstratos apresentaram níveis elevados de neutralidade, refletindo dificuldades frequentemente relatadas na literatura sobre o ensino tradicional de Física no Ensino Médio (Moreira, 2018).

Gráfico 3: Análise do Pré Questionário



Fonte: O Autor

A afirmação “Acredito que o estudo de física moderna, como a Relatividade, é muito difícil e inacessível para estudantes do ensino médio” apresentou um padrão de respostas fortemente concentrado nos níveis de discordância. Somando-se as categorias Discordo totalmente (3 alunos) e Discordo (16 alunos), observa-se que 19 estudantes rejeitam explicitamente a ideia de inacessibilidade da Física Moderna. Por outro lado, apenas 9 alunos concordaram ou concordaram totalmente com essa afirmação. Esse resultado indica que, antes da intervenção, a maioria dos estudantes não percebia a Física Moderna como intrinsecamente inacessível, ainda que isso não implique, necessariamente, domínio conceitual do tema.

Esse dado é relevante porque contraria um discurso recorrente na literatura e no senso comum escolar de que estudantes do Ensino Médio rejeitam previamente conteúdos de Física Moderna por considerá-los excessivamente complexos (Ostermann & Moreira, 2000). No contexto desta pesquisa, o obstáculo inicial parece estar menos associado à rejeição e mais à ausência de compreensão estruturada, aspecto que será explorado nas análises conceituais.

A afirmação “Entendo a gravidade como uma força que ‘puxa’ os objetos para baixo” apresentou ampla concordância: 29 estudantes marcaram Concordo (22) ou Concordo totalmente (7). Apenas 2 estudantes discordaram, e 9 permaneceram neutros. Esse resultado evidencia a predominância do modelo newtoniano intuitivo e local da gravidade, fortemente ancorado na experiência cotidiana.

Do ponto de vista conceitual, esse dado é extremamente significativo. Ele confirma a presença de uma concepção prévia clássica, coerente com a Física Newtoniana, mas limitada para a compreensão da Relatividade Geral, que descreve a gravidade como um efeito geométrico associado à curvatura do espaço-tempo. Esse cenário cria um terreno fértil para a intervenção didática, mas também impõe o desafio de promover uma ruptura conceitual cuidadosamente mediada.

Quando questionados sobre a afirmação *“Sei o que é um buraco negro”*, os estudantes apresentaram uma distribuição relativamente equilibrada: 18 alunos concordaram ou concordaram totalmente, enquanto 8 discordaram e 14 permaneceram neutros. Esse padrão sugere que uma parcela significativa dos estudantes possui uma familiaridade declarada, ainda que possivelmente superficial, com o tema dos buracos negros.

Esse tipo de resultado é típico de conteúdos amplamente divulgados pela mídia científica e cultura popular. A literatura aponta que esses conhecimentos prévios costumam estar associados a imagens espetacularizadas, nem sempre alinhadas com a descrição científica rigorosa (Hawking, 1988; Morais, 2022). Assim, o desafio pedagógico não é introduzir o tema, mas refinar, organizar e problematizar essas concepções iniciais.

A afirmação *“Sinto-me desinteressado(a) por aulas de física que se baseiam apenas em explicações do professor e resolução de exercícios no quadro”* apresentou um padrão distribuído, com 17 alunos concordando ou concordando totalmente e 19 discordando ou discordando totalmente. Esse equilíbrio sugere uma heterogeneidade de expectativas pedagógicas entre os estudantes. Em contraste, a afirmação *“As aulas de física seriam mais interessantes se usassem experimentos práticos e modelos visuais”* apresentou concordância quase unânime: 36 estudantes concordaram ou concordaram totalmente. Esse dado revela uma demanda clara por estratégias didáticas mais visuais, experimentais e interativas, reforçando a pertinência do uso de análogos físicos e modelos no contexto da intervenção proposta.

No que se refere à aprendizagem em grupo, a afirmação *“Acredito que a discussão em grupo com meus colegas me ajuda a entender melhor os conceitos complexos da física”* apresentou alto nível de concordância: 31 estudantes marcaram Concordo ou Concordo totalmente. Apenas 3 discordaram, e 6 permaneceram neutros. Esse resultado indica uma predisposição positiva dos

estudantes para estratégias colaborativas, o que é um fator fundamental para a implementação bem-sucedida do método Peer Instruction. Ao mesmo tempo, a afirmação *“Prefiro que o professor explique todo o conteúdo antes de fazer perguntas”* também apresentou forte concordância (37 estudantes), revelando uma tensão pedagógica importante: os alunos valorizam a interação, mas ainda mantêm expectativas associadas a um modelo transmissivo tradicional.

A afirmação *“Consigo explicar a diferença entre a gravidade de Newton e a de Einstein”* apresentou um padrão de discordância expressivo: 30 estudantes discordaram ou discordaram totalmente. Apenas 3 alunos concordaram. Esse dado confirma que, apesar da familiaridade declarada com termos como “buraco negro” e “Relatividade”, a compreensão conceitual profunda não estava presente no início da intervenção. De modo semelhante, a afirmação *“Acredito que a gravidade afeta apenas objetos com massa, e não a luz”* apresentou 11 alunos concordando, 11 discordando e 20 neutros, evidenciando uma zona de incerteza conceitual em relação a um dos resultados centrais da Relatividade Geral: a deflexão da luz por campos gravitacionais.

A afirmação *“Tenho dificuldade em imaginar conceitos abstratos da física, como o espaço-tempo”* apresentou 17 estudantes concordando e 11 neutros, indicando que uma parcela significativa reconhece dificuldades cognitivas relacionadas à abstração. Esse resultado reforça a importância de estratégias didáticas que auxiliem na visualização e modelização de conceitos abstratos. Por outro lado, a afirmação *“Acredito que o conhecimento científico é importante para entender o mundo ao meu redor”* obteve concordância quase total (39 estudantes), revelando uma valorização epistemológica da ciência, mesmo diante das dificuldades conceituais relatadas.

De forma geral, os dados do questionário pré-intervenção revelam um cenário caracterizado por:

- i) predisposição positiva para a Física Moderna e para metodologias interativas;
- ii) forte presença de concepções clássicas e intuitivas sobre gravidade;
- iii) familiaridade superficial com temas contemporâneos, como buracos negros;

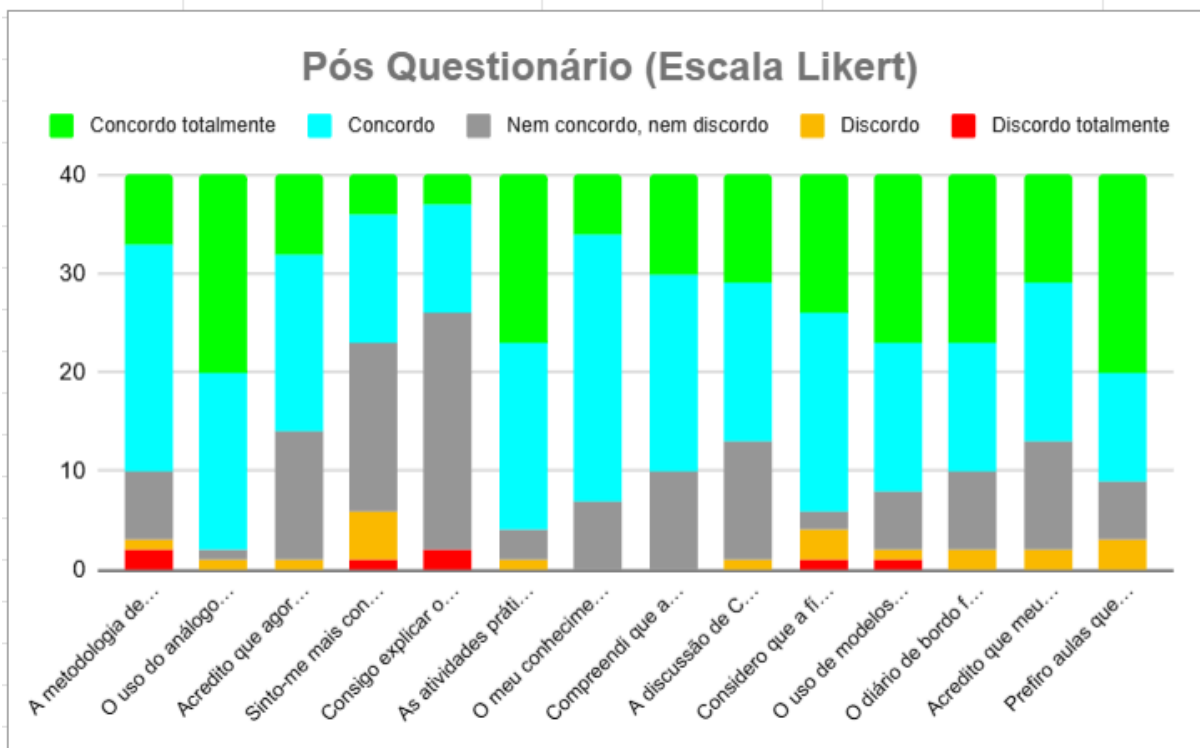
iv) limitações claras na compreensão conceitual profunda.

Esse conjunto de evidências justifica plenamente a escolha do Peer Instruction aliado ao uso de análogos físicos como estratégia pedagógica, uma vez que o contexto inicial dos estudantes demandava não apenas transmissão de informações, mas confronto conceitual, mediação pedagógica e construção coletiva de significados.

4.4.2 Pós-intervenção

Os resultados do questionário pós-intervenção indicam uma avaliação amplamente positiva da proposta didática, especialmente no que se refere ao uso combinado da metodologia *Peer Instruction* e do análogo mecânico para o ensino de conceitos associados à Relatividade Geral. Observa-se, de modo geral, uma concentração elevada de respostas nos níveis “Concordo” e “Concordo totalmente”, o que sugere uma percepção favorável dos estudantes quanto à aprendizagem conceitual e ao engajamento promovido pela intervenção.

Gráfico 4: Análise Pós Questionário



Fonte: O Autor

Na afirmação “A metodologia de discussão em pares (*Peer Instruction*) me ajudou a compreender melhor os conceitos de física”, 30 estudantes manifestaram

concordância (23 concordam e 7 concordam totalmente), enquanto apenas 3 se posicionaram em algum grau de discordância e 7 permaneceram neutros. Esse resultado reforça evidências já consolidadas na literatura de que o *Peer Instruction* favorece a aprendizagem conceitual ao estimular a argumentação e o confronto de ideias entre pares (Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001; Freeman et al., 2014).

De forma ainda mais expressiva, o item referente ao *uso do análogo mecânico para compreender a curvatura do espaço-tempo* apresentou 38 respostas positivas (18 concordo e 20 concordo totalmente), com ausência quase total de discordância. Esse dado indica que o análogo cumpriu seu papel de mediação cognitiva, auxiliando na visualização de um conceito altamente abstrato, conforme defendido por Duit (1991) e Morais (2022) no que se refere ao uso criterioso de analogias no ensino de Física Moderna.

No que diz respeito à compreensão conceitual da gravitação relativística, o item “*Acredito que agora entendo melhor a diferença entre a gravidade de Newton e a de Einstein*” apresentou 26 respostas positivas, embora ainda se observe um contingente relevante de estudantes posicionados na neutralidade (13 respostas). Esse resultado sugere que, apesar dos avanços, a distinção entre os dois paradigmas permanece conceitualmente desafiadora, o que está de acordo com estudos que apontam a necessidade de múltiplas abordagens e retomadas conceituais para conteúdos de ruptura epistemológica (Ostermann & Moreira, 2000; Moreira, 2018).

A percepção de desenvolvimento de habilidades argumentativas também se mostrou moderadamente positiva. No item “*Sinto-me mais confiante para discutir e argumentar sobre fenômenos complexos da física*”, 17 estudantes concordaram ou concordaram totalmente, enquanto 17 permaneceram neutros e 6 manifestaram discordância. Esse dado indica que o desenvolvimento da argumentação científica, embora estimulado pelo *Peer Instruction*, demanda tempo e continuidade para se consolidar plenamente (Freeman et al., 2014; Araújo et al., 2017).

Resultados semelhantes aparecem no item relacionado à capacidade de explicar o conceito de *horizonte de eventos*, no qual 14 estudantes manifestaram concordância, enquanto 24 se posicionaram de forma neutra. Essa distribuição sugere que, embora o tema tenha sido explorado, muitos alunos reconhecem limites em sua própria compreensão, o que evidencia uma postura metacognitiva positiva e coerente com processos de aprendizagem significativa (Moreira, 2018). Por outro

lado, itens relacionados ao engajamento e à acessibilidade didática apresentaram resultados bastante expressivos. No item “*As atividades práticas e visuais tornaram as aulas sobre relatividade mais acessíveis e interessantes*”, 36 estudantes concordaram ou concordaram totalmente. Esse dado reforça a importância de recursos visuais e experimentais, especialmente em temas de Física Moderna, conforme apontam Ostermann e Moreira (2000) e Ferreira et al. (2021).

A ampliação do conhecimento específico sobre buracos negros também foi fortemente reconhecida pelos estudantes, com 33 respostas positivas no item correspondente. De modo semelhante, o entendimento da *dilatação gravitacional do tempo* apresentou 30 respostas de concordância, indicando que conceitos relativísticos centrais foram apropriados, ao menos em nível qualitativo, objetivo coerente com propostas contemporâneas para o Ensino Médio (Marques & Soltau, 2022).

No que se refere às estratégias metodológicas, destaca-se o item “*A discussão de Concept Questions me estimulou a pensar de forma crítica antes de responder*”, com 27 respostas positivas. Esse resultado está em consonância direta com os pressupostos do *Peer Instruction*, que enfatiza o papel das questões conceituais como catalisadoras do pensamento crítico e da autorregulação da aprendizagem (Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001).

Destaque-se ainda a importância da avaliação do *diário de bordo*, considerado útil por 30 estudantes, bem como a preferência majoritária por aulas que combinam explicação do professor com atividades interativas (31 respostas positivas). Esses resultados indicam que os estudantes valorizam práticas pedagógicas híbridas, que articulam mediação docente, interação social e reflexão individual, conforme defendido por Moreira (2018) e Freeman et al. (2014).

Assim, os dados do questionário pós-intervenção evidenciam que a proposta pedagógica foi bem recebida pelos estudantes, promovendo maior engajamento, compreensão conceitual e valorização da Física Moderna como um conhecimento acessível no Ensino Médio. Esses achados reforçam a pertinência da articulação entre *Peer Instruction* e análogos mecânicos como estratégia didática para conteúdos de elevada complexidade conceitual.

4.5 Análise dos diários de bordo dos estudantes

Os diários de bordo constituíram um instrumento qualitativo fundamental para

a análise dos processos de aprendizagem ao longo da intervenção pedagógica. Esse tipo de registro permite acessar não apenas os produtos finais da aprendizagem, mas também os percursos sociocognitivos, afetivos e metacognitivos dos estudantes, oferecendo uma perspectiva complementar aos dados quantitativos obtidos por meio de testes conceituais e questionários estruturados (Moreira, 2018; Creswell, 2014).

Figura 15: Momento em que os alunos faziam registros no Diário de Bordo



Fonte: O Autor

Analisou-se 20 diários de bordo ao longo das seis aulas da sequência didática, levando em consideração os diários de maior completude, os estudantes foram orientados a registrar os principais conceitos abordados, suas dúvidas, percepções sobre as atividades desenvolvidas e relações estabelecidas com conhecimentos prévios. De acordo com Ausubel (2003) e Driver et al. (1999), esse procedimento está alinhado a abordagens construtivistas e socioconstrutivistas de aprendizagem, que enfatizam a importância da reflexão consciente sobre o próprio processo de aprender.

A análise dos diários revelou que, nas aulas iniciais, os registros eram predominantemente descritivos e superficiais, com forte presença de termos cotidianos e explicações intuitivas sobre fenômenos astronômicos e buracos negros. Esse padrão é coerente com a literatura, que aponta que concepções iniciais sobre Física Moderna costumam ser fortemente influenciadas por senso comum e por representações midiáticas simplificadas (Ostermann & Moreira, 2000).

À medida que a sequência didática avançou, especialmente após a introdução

do análogo mecânico e das discussões mediadas pelo método *Peer Instruction*, observou-se uma mudança gradual na natureza dos registros. Os estudantes passaram a empregar termos mais próximos do discurso científico, como “curvatura do espaço-tempo”, “campo gravitacional” e “horizonte de eventos”, ainda que, em alguns casos, de forma parcial ou incompleta. Esse movimento é indicativo de um processo de reconstrução conceitual em curso, como defende Moreira (2018).

Os diários também evidenciaram momentos recorrentes de conflito cognitivo, sobretudo nas aulas em que se discutiu a transição da gravitação newtoniana para a perspectiva relativística. Muitos estudantes registraram explicitamente a dificuldade em abandonar a ideia de gravidade como força à distância, reconhecendo a necessidade de “pensar diferente” sobre o fenômeno.

Figura 16: Anotações do aluno A no diário de bordo.

- Fichamento:**
1. Newton \rightarrow Para qualquer coisa, em força tudo que tem massa
 2. tem gravidade $G = F = m\vec{g}$
 3. Einstein \rightarrow Para ele era uma aceleração $g = \vec{a}$
 4. associado a curvatura do espaço-tempo \rightarrow 4Dimensional
 5. Geodésia \rightarrow a linha curva
 6. $E = mc^2$ = fórmula de Einstein
 7. Newton: gravidade é uma força de atração entre massas. Funciona instantaneamente
 8. através do espaço vazio. Limitação: não explica como a gravidade "liga" um gravitacional
 9. o que ocorre em campo, segundo a curvatura.
 10. Einstein: Relatividade: Massa deforma o tecido do espaço-tempo, e outros objetos

Fonte: Próprio autor

Figura 17: Anotações do aluno B no diário de bordo.

1. Newton / para Newton tudo que tem massa significa
2. gravidade
- 3.
4. Einstein / para Einstein o conceito de gravidade
5. está relacionado no levantamento do espaço tempo
6. altura, largura, e comprimento
7. "geodésia"
- 8.
- 9.

Fonte: Próprio autor

Segundo a literatura, esse tipo de desconforto intelectual é um elemento central para a aprendizagem significativa de conceitos de ruptura epistemológica (Ostermann & Moreira, 2000).

Outro aspecto relevante identificado nos diários foi a valorização das discussões entre pares. Observou-se que diversos estudantes trocaram ou reformularam suas respostas das *Concept Questions*, a troca de argumentos com colegas os ajudou a perceber erros de raciocínio e a reformular suas explicações. Esses registros reforçam evidências já consolidadas sobre o papel da interação social na construção do conhecimento científico, especialmente em metodologias ativas como o *Peer Instruction* (Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001).

Os registros também permitiram identificar diferenças individuais no ritmo e na profundidade da aprendizagem. Enquanto alguns estudantes apresentaram progressos conceituais claros ao longo das aulas, outros mantiveram explicações híbridas, combinando elementos da Física Clássica e da Relatividade Geral. Essa heterogeneidade é esperada em contextos reais de sala de aula e reforça a importância de instrumentos qualitativos para compreender nuances que testes objetivos não captam (Creswell, 2014).

Assim, os diários de bordo evidenciam que a intervenção promoveu não apenas ganhos conceituais, mas também avanços na reflexão, na linguagem científica e na postura crítica dos estudantes frente a conceitos complexos da Física Moderna. Esses resultados reforçam a importância do uso de instrumentos qualitativos no ensino de Física, especialmente quando se trabalha com metodologias ativas e conteúdos de elevado grau de abstração.

4.6 Discussão integrada dos resultados da intervenção pedagógica

A análise integrada dos diferentes instrumentos de coleta de dados utilizados nesta pesquisa permite uma compreensão holística dos efeitos da intervenção pedagógica baseada no uso de análogos mecânicos articulados à metodologia *Peer Instruction*. A triangulação entre dados quantitativos e qualitativos fortalece a validade dos resultados, ao evidenciar convergências entre desempenho conceitual, percepções dos estudantes e registros reflexivos produzidos ao longo da sequência didática (Creswell, 2014).

Os resultados obtidos no teste conceitual pré e pós-intervenção indicaram ganhos de aprendizagem mensuráveis, analisados por meio do ganho normalizado

de Hake. A presença de estudantes distribuídos nos diferentes intervalos percentuais de ganho evidencia que a intervenção não produziu efeitos homogêneos, mas promoveu avanços conceituais significativos para uma parcela expressiva da turma. Esse resultado é consistente com estudos que apontam que metodologias ativas tendem a aumentar o desempenho médio, ainda que preservem diferenças individuais de aprendizagem (Hake, 1998; Freeman et al., 2014).

A análise dos questionários em escala Likert reforça essa interpretação, ao indicar uma mudança positiva nas percepções dos estudantes em relação ao interesse pelos conteúdos de Física Moderna, à clareza conceitual e à utilidade das estratégias didáticas empregadas. Observou-se, no pós-intervenção, um aumento nos níveis de concordância com afirmações relacionadas à participação ativa, à compreensão conceitual e à relevância do uso de modelos e analogias. Esses dados sugerem que a intervenção impactou não apenas o domínio cognitivo, mas também dimensões atitudinais da aprendizagem (Brasil, 2017; Moreira, 2018).

Quando analisados em conjunto, os resultados do teste conceitual e dos questionários evidenciam uma relação coerente entre aprendizagem percebida e aprendizagem medida. Estudantes que relataram maior envolvimento e clareza conceitual tendem a apresentar ganhos mais elevados no teste, o que reforça a importância do engajamento cognitivo e emocional no processo de aprendizagem de conceitos abstratos, como os associados à Relatividade Geral (Ostermann & Moreira, 2000).

Os diários de bordo complementam essa análise ao revelar os caminhos pelos quais esses avanços ocorreram. Enquanto os instrumentos quantitativos indicam *quanto* os estudantes aprenderam, os registros qualitativos ajudam a compreender *como* esse aprendizado se desenvolveu. Os diários evidenciam processos de conflito cognitivo, reconstrução conceitual gradual e apropriação progressiva da linguagem científica, elementos centrais da aprendizagem significativa (Ausubel, 2003; Moreira, 2018).

A convergência entre os instrumentos também se manifesta na avaliação do uso do análogo mecânico. Os questionários indicam que os estudantes perceberam o análogo como facilitador da compreensão, enquanto os diários revelam uma apropriação crítica do modelo, com reconhecimento explícito de suas limitações. Essa combinação é particularmente relevante, pois aponta para um uso pedagogicamente adequado de analogias, conforme defendido por Duit (1991) e

Morais (2022).

Outro aspecto importante da discussão integrada diz respeito ao papel do *Peer Instruction* como mediador da aprendizagem. Os dados quantitativos mostram ganhos conceituais compatíveis com aqueles reportados na literatura, enquanto os registros qualitativos evidenciam que a interação entre pares foi um elemento-chave para a explicitação e o confronto de concepções prévias. Essa articulação está em consonância com resultados dos estudos de Mazur (1997) e Crouch e Mazur (2001), mesmo em um contexto de conteúdos conceitualmente desafiadores.

A análise integrada também permite identificar limitações da intervenção. Apesar dos avanços observados, alguns estudantes mantiveram explicações híbridas ou parciais, especialmente no que se refere à interpretação da gravidade como curvatura do espaço-tempo. Esses resultados indicam que a aprendizagem de conceitos de ruptura epistemológica exige tempo, revisitações conceituais e múltiplas representações, o que reforça a necessidade de abordagens continuadas e não pontuais (Ostermann & Moreira, 2000).

Do ponto de vista metodológico, a utilização combinada de testes conceituais, questionários Likert e diários de bordo mostrou-se adequada para avaliar intervenções educacionais complexas. Cada instrumento capturou dimensões distintas da aprendizagem, e sua integração possibilitou uma análise mais robusta e coerente do impacto da proposta didática (Creswell, 2014).

A discussão integrada dos resultados evidencia, portanto, que a proposta pedagógica não se limitou à transmissão de conteúdos, mas promoveu um ambiente de aprendizagem ativo, reflexivo e conceitualmente orientado. Os dados sugerem que a articulação entre análogos físicos e metodologias ativas constitui uma estratégia promissora para a introdução de temas da Física Moderna no Ensino Médio, desde que acompanhada de mediação docente intencional e fundamentação teórica sólida.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo investigar as contribuições do uso de um análogo mecânico de buracos negros articulado à metodologia *Peer Instruction* para o ensino de conceitos da Relatividade Geral no Ensino Médio. A análise integrada dos dados obtidos ao longo da intervenção permite afirmar que a proposta didática apresentou resultados consistentes, tanto no que se refere à aprendizagem

conceitual quanto às percepções dos estudantes sobre o processo de ensino-aprendizagem.

Os resultados do teste conceitual pré e pós-intervenção indicaram ganhos de aprendizagem mensuráveis, analisados por meio do ganho normalizado de Hake. A distribuição dos estudantes nos diferentes intervalos de ganho evidencia que a proposta favoreceu avanços conceituais significativos para uma parcela expressiva da amostra, em consonância com resultados clássicos da literatura sobre metodologias ativas no ensino de Física (Hake, 1998; Freeman et al., 2014).

A presença de estudantes com ganhos baixos ou moderados não invalida a eficácia da intervenção, mas reforça a compreensão de que a aprendizagem de conceitos associados à Relatividade Geral envolve rupturas epistemológicas profundas. Conforme argumentam Ostermann e Moreira (2000), conteúdos de Física Moderna demandam processos de reconstrução conceitual que dificilmente se completam em intervenções de curta duração.

Os questionários aplicados em escala Likert revelaram mudanças positivas nas percepções dos estudantes em relação ao interesse, à compreensão conceitual e à participação ativa nas aulas. Esses resultados sugerem que a proposta não impactou apenas o domínio cognitivo, mas também aspectos atitudinais da aprendizagem, alinhando-se às diretrizes da Base Nacional Comum Curricular, que enfatiza o desenvolvimento de competências relacionadas à argumentação científica e à análise crítica (Brasil, 2017).

A convergência entre os resultados do teste conceitual e dos questionários reforça a validade da intervenção. Estudantes que relataram maior engajamento e clareza conceitual tendem a apresentar melhores desempenhos, corroborando a literatura que aponta a relação entre envolvimento ativo e aprendizagem significativa (Mazur, 1997; Freeman et al., 2014).

Os diários de bordo desempenharam papel fundamental na compreensão dos processos de aprendizagem. Por meio desses registros, foi possível identificar momentos de conflito cognitivo, revisões conceituais e consolidação progressiva de ideias, elementos centrais da aprendizagem significativa segundo Ausubel (2003). Esses dados qualitativos complementam os resultados quantitativos e conferem maior profundidade à análise. Além disso, a análise dos diários também evidenciou o papel das interações entre pares no processo de aprendizagem. Foi possível observar que a discussão coletiva contribuiu para esclarecer dúvidas e confrontar

concepções prévias, reforçando o potencial do *Peer Instruction* como estratégia para promover aprendizagem conceitual, conforme proposto por Mazur (1997) e confirmado por Crouch e Mazur (2001).

O uso do análogo mecânico mostrou-se um elemento central da proposta didática. Os dados indicam que o análogo facilitou a visualização qualitativa de conceitos abstratos, como curvatura do espaço-tempo e horizonte de eventos. Contudo, os registros dos estudantes também revelam a importância da mediação docente para explicitar os limites da analogia, em consonância com as advertências de Duit (1991) sobre o uso pedagógico de analogias.

A articulação entre o análogo e a metodologia *Peer Instruction* revelou-se particularmente eficaz. Enquanto o análogo forneceu uma representação concreta para conceitos abstratos, o PI criou um ambiente de discussão que favoreceu a problematização dessas representações, evitando simplificações excessivas e promovendo reflexão conceitual crítica como defende Moraes (2022).

Do ponto de vista epistemológico, a proposta contribuiu para uma abordagem mais contemporânea da Física no Ensino Médio. Ao introduzir conceitos da Relatividade Geral de forma qualitativa, a intervenção aproximou os estudantes da ciência produzida atualmente, reforçando a ideia de que o conhecimento científico é dinâmico e historicamente situado (Ostermann & Moreira, 2000).

Os resultados também evidenciam que a introdução da Relatividade Geral no Ensino Médio é viável, desde que apoiada em estratégias didáticas adequadas. A utilização de modelos, analogias e metodologias ativas mostrou-se essencial para tornar acessíveis conceitos tradicionalmente considerados complexos para esse nível de ensino (Ferreira et al., 2021; Marques & Soltau, 2022).

Entre as limitações do estudo, destaca-se o número reduzido de participantes e o tempo limitado da intervenção. Esses fatores restringem a generalização dos resultados, mas não comprometem sua relevância no contexto de uma pesquisa aplicada, cujo foco é a análise aprofundada de uma proposta pedagógica específica (Creswell, 2014). Outra limitação refere-se à ausência de um grupo controle, o que impede comparações diretas com metodologias tradicionais. No entanto, a utilização de instrumentos pré e pós-intervenção e a triangulação de dados conferem solidez à análise dos efeitos observados.

Apesar dessas limitações, os resultados obtidos oferecem contribuições significativas para o ensino de Física Moderna no Ensino Médio. A proposta

desenvolvida demonstra que é possível articular rigor conceitual e acessibilidade pedagógica, desde que haja planejamento cuidadoso e fundamentação teórica consistente.

Do ponto de vista pessoal e profissional, a realização desta pesquisa possui um significado que ultrapassa os resultados acadêmicos apresentados. A escola em que a intervenção foi desenvolvida é a mesma na qual cursei meu Ensino Médio e, atualmente, atuo como professor. Retornar a esse espaço, agora na condição de pesquisador e docente, para implementar um projeto vinculado ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, representou não apenas um percurso de investigação científica, mas também um movimento de reencontro com a própria história formativa. Essa dimensão biográfica conferiu à pesquisa um sentido particular de responsabilidade e compromisso, uma vez que o trabalho não foi realizado em um contexto abstrato ou distante, mas em uma comunidade escolar da qual faço parte e com a qual mantenho vínculos afetivos, profissionais e sociais.

A escola em questão é uma instituição de pequeno porte, situada em uma região periférica e historicamente marcada por limitações estruturais e por baixo investimento financeiro. Esse contexto impõe desafios cotidianos ao trabalho docente e, muitas vezes, restringe o acesso dos estudantes a experiências educacionais inovadoras e a recursos didáticos diversificados. Desenvolver e aplicar uma proposta que articula análogo mecânico, metodologias ativas e conceitos de Física Moderna nesse cenário reforçou a convicção de que a qualidade do ensino não deve ser pensada apenas a partir da disponibilidade de recursos materiais, mas também da criatividade pedagógica, do planejamento didático e do compromisso com a aprendizagem dos estudantes. Nesse sentido, a pesquisa também se configura como um gesto de resistência e de afirmação do potencial transformador da escola pública, mesmo em contextos socialmente vulneráveis.

O fato de ter sido aluno dessa mesma instituição no passado conferiu à experiência um caráter ainda mais simbólico. Ao reencontrar corredores, salas e estudantes que compartilham realidades semelhantes àsquelas que vivi, tornou-se evidente a importância de produzir conhecimento que dialoga diretamente com a prática docente e com as necessidades concretas da comunidade escolar. A possibilidade de contribuir, ainda que de forma pontual, para ampliar o horizonte formativo desses estudantes, oferecendo contato com temas da Física Moderna e com estratégias de ensino mais participativas, reforça a dimensão social desta

pesquisa e seu alinhamento com os objetivos do MNPEF, que busca justamente aproximar a produção acadêmica da realidade da sala de aula.

Do ponto de vista formativo, a pesquisa também representou um processo de amadurecimento profissional. Planejar, implementar, avaliar e refletir sobre uma intervenção didática em um contexto real de ensino exigiu a articulação entre teoria e prática, entre fundamentação conceitual e sensibilidade pedagógica. Esse percurso contribuiu para consolidar uma postura docente mais reflexiva, atenta aos processos de aprendizagem dos estudantes e às múltiplas dimensões que atravessam o ensino de Física na escola básica. Além disso, reforçou a compreensão de que o professor-pesquisador ocupa um lugar estratégico na produção de conhecimentos educacionais, especialmente quando suas investigações nascem das demandas concretas do cotidiano escolar.

É possível afirmar que esta pesquisa também se configura como uma forma de devolutiva à comunidade que contribuiu para minha formação. Desenvolver um projeto de mestrado na escola onde me formei e onde atualmente atuo significa, em alguma medida, reconhecer o papel dessa instituição na minha trajetória e buscar retribuir por meio de uma proposta que visa qualificar o ensino e ampliar as oportunidades educacionais dos estudantes. Esse movimento de retorno, agora como pesquisador, reafirma a convicção de que a educação científica pode e deve ser um instrumento de transformação social, especialmente em contextos marcados por desigualdades, e reforça o sentido ético e social do trabalho docente e da pesquisa em ensino.

No contexto do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, este trabalho reforça a importância do desenvolvimento de produtos educacionais que se conectem a prática docente. O guia didático elaborado constitui um material potencialmente replicável e adaptável a diferentes contextos escolares, ampliando o alcance da proposta. Ao mesmo tempo, a avaliação prévia do produto por um comitê *ad hoc* contribuiu para o aprimoramento do material, garantindo maior clareza conceitual, organização didática e adequação estética. Esse processo reforça a importância da validação coletiva de produtos educacionais antes de sua implementação em sala de aula.

Os resultados deste estudo também apontam para a necessidade de formação continuada de professores no que se refere ao ensino de Física Moderna. A familiaridade com os conceitos e com estratégias didáticas inovadoras é

fundamental para a efetiva inserção desses temas no currículo escolar.

Como perspectivas para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação da proposta para outras turmas e contextos, bem como a realização de estudos longitudinais que investiguem a permanência dos ganhos conceituais ao longo do tempo. Além disso, a comparação com grupos controle pode fornecer evidências adicionais sobre a eficácia da metodologia.

Assim, ao final desse percurso formativo, sublinha-se que a intervenção pedagógica analisada neste estudo atingiu seus objetivos, oferecendo evidências de que o ensino de Relatividade Geral no Ensino Médio é não apenas possível, mas pedagogicamente relevante quando fundamentado em estratégias didáticas adequadas e teoricamente fundamentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, B. P. et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical Review Letters*, v. 116, 061102, 2016.

ARAÚJO, I. S. et al. Uma associação do método Peer Instruction com circuitos elétricos em contextos de aprendizagem ativa. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 39, n. 2, e2402, 2017.

ASHBY, N. Relativity in the Global Positioning System. *Living Reviews in Relativity*, v. 6, n. 1, 2003.

AUSUBEL, D. P. *Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva*. Lisboa: Plátano, 2003.

BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. São Paulo: Edições 70, 2016.

BLACK, P.; WILIAM, D. Assessment and classroom learning. *Assessment in Education*, v. 5, n. 1, p. 7–74, 1998.

BOGDAN, R. C.; BIKLEN, S. K. *Investigação qualitativa em educação: uma introdução à teoria e aos métodos*. Porto: Porto Editora, 2010.

BOONE, H. N.; BOONE, D. A. Analyzing Likert Data. *Journal of Extension*, v. 50, n. 2, 2012.

BRASIL. Base Nacional Comum Curricular. Ministério da Educação, 2017.

BRASIL. Conselho Nacional de Saúde. Resolução nº 510, de 7 de abril de 2016.

COSTA, Simone D. P. *Astronomia para o primeiro segmento do Ensino Fundamental: Uma sequência didática com os métodos de ensino Estudo De Caso e Peer Instruction*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-Graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de

Física, Campos dos Goytacazes/RJ, 2021.

CRESWELL, J. W. Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. 4. ed. Thousand Oaks: Sage, 2014.

CROUCH, C. H.; MAZUR, E. Peer Instruction: Ten years of experience and results. American Journal of Physics, v. 69, n. 9, p. 970–977, 2001.

DINIZ, Allan. Implementação do Método Peer Instruction em aulas de Física no Ensino Médio. Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Viçosa MG, 2015.

DRIVER, R. et al. Making sense of secondary science. London: Routledge, 1999.

DUIT, R. On the role of analogies and metaphors in learning science. Science Education, v. 75, n. 6, p. 649–672, 1991.

EHT COLLABORATION. First M87 Event Horizon Telescope results. Astrophysical Journal Letters, v. 875, L1, 2019.

EINSTEIN, A. The foundation of the general theory of relativity. Annalen der Physik, v. 49, p. 769–822, 1916.

FERREIRA, L. G.; SILVA, E. F.; COSTA, S. S. Estratégias didáticas para o ensino de Relatividade Geral no Ensino Médio. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 43, e20210123, 2021.

FREEMAN, S. et al. Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 111, n. 23, p. 8410–8415, 2014.

FREIRE, Joseil Carvalho. Evolução de conceitos de mundo: uma proposta para inserção da teoria da relatividade no ensino médio. Dissertação de mestrado profissional. Universidade Federal de Lavras-MG, 2015.

GARMS, Marco A.; GRIME, Gabriel C.; CALDAS, Iberê L. Influência da massa na geometria do espaço-tempo. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 46, e20240083, 2024.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GILBERT, J. K. Models and modelling: Routes to more authentic science education. International Journal of Science and Mathematics Education, v. 2, p. 115–130, 2004.

HAKE, R. Interactive-engagement versus traditional methods. American Journal of Physics, v. 66, n. 1, p. 64–74, 1998.

HARTLE, J. B. Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity. Addison-Wesley, 2003.

HAWKING, STEPHEN. Uma breve história do tempo: do Big Bang aos buracos negros. Rio de Janeiro: Intrínseca, 1988.

HESTENES, D.; WELLS, M.; SWACKHAMER, G. Force Concept Inventory. The Physics Teacher, v. 30, n. 3, p. 141–158, 1992. HAWKING, S. (1988). A Brief History of Time. Bantam Books.

JAMIESON, S. Likert scales: How to (ab)use them. Medical Education, v. 38, n. 12, p. 1217–1218, 2004.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. Fundamentos de metodologia científica. São Paulo: Atlas, 2017.

LIKERT, R. A technique for the measurement of attitudes. Archives of Psychology, v. 22, n. 140, 1932.

MARQUES, A. F.; SOLTAU, S. B. Relatividade Geral no Ensino Médio: desafios e possibilidades. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 39, n. 2, p. 456–478, 2022.

MISNER, C. W.; THORNE, K. S.; WHEELER, J. A. Gravitation. W. H. Freeman, 1973.

MORAIS, A. M. Buracos negros no ensino de Física: potencialidades e limites didáticos. Investigações em Ensino de Ciências, v. 27, n. 3, p. 123–145, 2022.

MORAIS, C. E. de. O uso de analogias e modelos no ensino de relatividade geral no ensino médio. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 44, e20220123, 2022.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa e ensino de Ciências. Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia, v. 11, n. 3, 2018.

MAZUR, E. Peer Instruction: A User's Manual. Prentice Hall, 1997.

MAZUR, Eric. Peer instruction : a revolução da aprendizagem ativa / Eric Mazur ; tradução: Anatólio Laschuk. – Porto Alegre : Penso, 2015.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa em ensino de Física Moderna e Contemporânea. Investigações em Ensino de Ciências, v. 5, n. 1, p. 23–48, 2000.

OLIVEIRA, M.K.D. Vygotsky: Aprendizado e desenvolvimento um processo sócio histórico. São Paulo: Scipione, 1993, 111 p.

PLICKERS. Plickers: A free student response system. Link: <https://www.plickers.com>

PLOMP, T. Educational design research: An introduction. In: PLOMP, T.; NIEVEEN, N. (org.). Educational design research. Enschede: SLO, 2013.

RAMALHO, Ronildo de Andrade. Conceitos de cinemática apoiados na metodologia peer instruction para alunos de EJA. 111 f. 2019. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus Centro, Manaus, 2019.

REEVES, T. C. Design research from a technology perspective. In: VAN DEN AKKER, J. et al. (org.). Educational design research. London: Routledge, 2006.

SCHWARZSCHILD, K. On the gravitational field of a mass point according to Einstein's theory. 1916.

STUDART, Nelson. Inovando a Ensino de Física com Metodologias Ativas. Revista do Professor de Física, v. 3, n. 3, p. 1-24, Brasília, 2019. Instituto de Física - Universidade de Brasília.

TAVARES, R.; BOAS, A. V.; OLIVEIRA, M. P. Modelos e analogias no ensino de Ciências. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 10, n. 2, p. 87-98, 1993.

VYGOTSKY, L. S. A formação social da mente. São Paulo: Martins Fontes, 2008.

WALD, R. M. General Relativity. University of Chicago Press, 1984.

WILL, C. M. The confrontation between general relativity and experiment. Living Reviews in Relativity, v. 17, n. 4, 2014.

ZABALZA, M. A. Diários de aula: um instrumento de pesquisa e desenvolvimento profissional. Porto Alegre: Artmed, 2004.

APÊNDICE I - QUESTIONÁRIO PRÉ-INTERVENÇÃO

Instituição: Escola Estadual Prof^a Cecília Ferreira da Silva

Pesquisador Responsável: Eliabe Rafael Figueira Cardoso

Componente Curricular: Física

Público-Alvo: Discentes da 3^a Série do Ensino Médio

Data: ____/____/____

APRESENTAÇÃO

Este instrumento de pesquisa visa diagnosticar as concepções prévias e as percepções dos estudantes do ensino médio acerca de tópicos de física moderna, especificamente relacionados à Relatividade Geral. As informações coletadas são fundamentais para o desenvolvimento de metodologias de ensino-aprendizagem alinhadas ao perfil do aluno, conforme proposto no projeto de pesquisa em andamento. O seu preenchimento é essencial para a validação da pesquisa.

INSTRUÇÕES DE PREENCHIMENTO:

- Este questionário não possui caráter avaliativo de desempenho, portanto, não afeta sua nota.
- Suas respostas serão tratadas com total confidencialidade e anonimato, sendo utilizadas exclusivamente para fins estatísticos e de análise qualitativa da pesquisa.
- Leia cada enunciado cuidadosamente e, em seguida, assinale a opção na escala de Likert que mais se alinha com sua perspectiva ou conhecimento atual.
- Em cada item, assinale apenas uma das cinco opções.

ESCALA DE RESPOSTAS (ESCALA LIKERT):

- **Discordo totalmente:** A proposição é completamente inconsistente com sua visão.
- **Discordo:** A proposição não reflete sua opinião.
- **Nem concordo, nem discordo:** Você não tem uma posição definida sobre a proposição.
- **Concordo:** A proposição está de acordo com sua percepção.
- **Concordo totalmente:** A proposição expressa com exatidão sua opinião.

Afirmção	Discordo totalmente	Discordo	Nem concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente
Acredito que o estudo de física moderna, como a Relatividade, é muito difícil e inacessível para estudantes do ensino médio.					
Sinto-me desinteressado(a) por aulas de física que se baseiam apenas em explicações do professor e resolução de exercícios no quadro.					
Entendo a gravidade como uma força que “puxa” os objetos para baixo.					

As aulas de física seriam mais interessantes se usassem experimentos práticos e modelos visuais.					
Sei o que é um buraco negro.					
Acredito que a discussão em grupo com meus colegas me ajuda a entender melhor os conceitos complexos da física.					
Prefiro que o professor explique todo o conteúdo antes de fazer perguntas.					
Consigo explicar a diferença entre a gravidade de Newton e a de Einstein.					
Acredito que a física está desconectada da minha vida e do meu cotidiano.					
Sinto-me confortável em expressar minhas dúvidas e opiniões durante as aulas de física.					
Acredito que a gravidade afeta apenas objetos com massa, e não a luz.					
Tenho dificuldade em imaginar conceitos abstratos da física, como o espaço-tempo.					
Acredito que o conhecimento científico é importante para entender o mundo ao meu redor.					
A melhor forma de avaliar o meu aprendizado é através de provas escritas tradicionais.					
Tenho curiosidade sobre como as estrelas morrem e se transformam em outros objetos celestes.					

APÊNDICE 2 - QUESTIONÁRIO PÓS-INTERVENÇÃO

Instituição: Escola Estadual Prof^a Cecília Ferreira da Silva

Pesquisador Responsável: Eliabe Rafael Figueira Cardoso

Componente Curricular: Física

Público-Alvo: Discentes da 3^a Série do Ensino Médio

Participante:

Data: ____/____/____

APRESENTAÇÃO

Este questionário é a etapa final de nossa pesquisa. Ele visa avaliar o impacto da sequência didática recém-concluída em suas percepções e compreensão de conceitos de física moderna. Suas respostas são cruciais para a análise da eficácia das metodologias de ensino aplicadas. O objetivo é mensurar o desenvolvimento do pensamento crítico e a capacidade de argumentação científica, bem como a percepção sobre as metodologias de ensino-aprendizagem utilizadas, como o uso do análogo e o método *Peer Instruction*.

INSTRUÇÕES DE PREENCHIMENTO:

- Este questionário não possui caráter avaliativo de desempenho, portanto, não afeta sua nota.
- Suas respostas serão tratadas com total confidencialidade e anonimato, sendo utilizadas exclusivamente para fins estatísticos e de análise qualitativa da pesquisa.
- Leia cada enunciado cuidadosamente e, em seguida, assinale a opção na escala de Likert que mais se alinha com sua perspectiva ou conhecimento atual.
- Em cada item, assinale apenas uma das cinco opções.

ESCALA DE RESPOSTAS (ESCALA LIKERT):

- **Discordo totalmente:** A proposição é completamente inconsistente com sua visão.
- **Discordo:** A proposição não reflete sua opinião.
- **Nem concordo, nem discordo:** Você não tem uma posição definida sobre a proposição.
- **Concordo:** A proposição está de acordo com sua percepção.
- **Concordo totalmente:** A proposição expressa com exatidão sua opinião.

Afirmção	Discordo totalmente	Discordo	Nem concordo, nem discordo	Concordo	Concordo totalmente
A metodologia de discussão em pares (Peer Instruction) me ajudou a compreender melhor os conceitos de física.					
O uso do análogo mecânico (como o funil e areia) facilitou a minha compreensão sobre a curvatura do espaço-tempo.					
Acredito que agora entendo melhor a diferença entre a gravidade de Newton e a de Einstein.					

Sinto-me mais confiante para discutir e argumentar sobre fenômenos complexos da física.					
Consigo explicar o que é o "horizonte de eventos" de um buraco negro.					
As atividades práticas e visuais tornaram as aulas sobre relatividade mais acessíveis e interessantes.					
O meu conhecimento sobre a formação e as características dos buracos negros foi significativamente ampliado.					
Compreendi que a gravidade afeta não apenas a massa, mas também a passagem do tempo.					
A discussão de Concept Questions me estimulou a pensar de forma crítica antes de responder.					
Considero que a física moderna, como a relatividade, pode ser ensinada de forma compreensível no ensino médio.					
O uso de modelos análogos na pesquisa científica é importante para entender fenômenos que não podemos observar diretamente.					
O diário de bordo foi uma ferramenta útil para refletir sobre meu próprio aprendizado a cada aula.					
Acredito que meu pensamento crítico e minha curiosidade sobre o universo foram estimulados por este projeto.					
Prefiro aulas que combinam explicações do professor com atividades interativas e discussões entre os alunos.					

APÊNDICE 3 - PRÉ E PÓS-TESTE CONCEITUAL

Componente Curricular: Física

Professor: Eliabe Rafael Figueira Cardoso

Estudante:

Turma:

Turno:

Data:

Relatividade Geral

1. Segundo a Teoria da Relatividade Geral, a gravitação é resultado de:

- (a) Uma força de atração entre massas.
- (b) Uma interação mediada por partículas invisíveis.
- (c) A curvatura do espaço-tempo causada pela presença de massa e energia.
- (d) A rotação dos corpos celestes no espaço.

2. A principal diferença entre a gravitação de Newton e a Relatividade Geral é que:

- (a) A Relatividade elimina completamente o conceito de gravidade.
- (b) Newton explica a gravidade como força à distância, enquanto Einstein a descreve como curvatura do espaço-tempo.
- (c) Einstein acrescenta apenas correções numéricas às leis de Newton.
- (d) Ambas teorias são idênticas em qualquer situação.

3. O princípio da equivalência afirma que:

- (a) Toda massa é equivalente à sua carga elétrica.
- (b) O repouso e o movimento são indistinguíveis.
- (c) Os efeitos de um campo gravitacional uniforme são localmente indistinguíveis dos efeitos de uma aceleração.
- (d) A luz não é afetada pela gravidade.

4. O princípio da covariância geral, formulado por Einstein, afirma que:

- (a) As leis da Física são as mesmas apenas em referenciais inerciais.
- (b) As leis da Física devem ter a mesma forma em todos os sistemas de coordenadas, independentemente do movimento ou da gravidade.
- (c) A gravidade depende da escolha de um referencial privilegiado no espaço.
- (d) O espaço e o tempo são grandezas absolutas, válidas em qualquer referencial.

5. O horizonte de eventos de um buraco negro é:

- (a) Uma região de matéria extremamente densa.
- (b) A fronteira a partir da qual nem a luz pode escapar.
- (c) A superfície sólida do buraco negro.
- (d) O ponto onde o tempo para completamente em qualquer referencial.

6. Um observador distante vê um corpo caindo em direção a um buraco negro:

- (a) Atravessar o horizonte e desaparecer rapidamente.
- (b) Parecer desacelerar e nunca atravessar o horizonte (devido à dilatação temporal).
- (c) Aumentar de tamanho até explodir.
- (d) Oscilar indefinidamente.

7. Explique, com suas palavras, o que é a Gravidade, segundo a Relatividade Geral.

8. Como a Relatividade Geral explica a trajetória da luz ao passar próxima a uma estrela massiva?

9. Descreva o que aconteceria com um relógio que se aproximasse de um buraco negro e como isso seria percebido por um observador distante.

10. Muitos pensam que “buracos negros sugam tudo”. Explique por que essa ideia é incorreta ou incompleta à luz da Relatividade Geral.

APÊNDICE 4 - DIÁRIO DE BORDO DE FÍSICA

Professor: Eliabe Rafael Figueira Cardoso

Estudante: _____

Turma: _____ **Data:** _____

Número da Aula: _____

Tema da Aula: _____

Fichamento:

1. _____
2. _____
3. _____
4. _____
5. _____
6. _____
7. _____
8. _____
9. _____
10. _____

Análise das *Concept Questions*:

- **Minha resposta inicial:** _____
- **Discussão em pares:** _____
- **Minha nova resposta:** _____
- **Conclusão do professor:** _____

Dúvidas e Reflexões:

APÊNDICE 5 - PARECER CEP

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAZONAS - IFAM



Continuação do Parecer: 7.896.807

pedagógico-didático serão discutidos à luz da literatura especializada, destacando as contribuições do projeto para o ensino de Física. Sugerindo também direções para futuras pesquisas visando inovar na forma de ensinar conceitos complexos e contribuir para a formação de estudantes mais engajados e críticos".

Objetivo da Pesquisa:

OBJETIVOGERAL

Desenvolver e implementar um análogo mecânico de buracos negros em sala de aula, utilizando a metodologia de Peer Instruction, para facilitar o ensino de conceitos associados à gravitação e relatividade.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i) Desenvolver um análogo mecânico que simule as propriedades básicas de um buraco negro;
- ii) Elaborar um conjunto de perguntas conceituais para serem utilizadas na metodologia de PI;
- iii) Implementar o análogo mecânico e a metodologia de PI em turmas do 3º ano do ensino médio;
- iv) Avaliar a eficácia do método através de testes e questionários aplicados antes e depois da intervenção.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

A implementação de projetos pedagógicos de pesquisa em ambientes escolares está sujeita a riscos que podem afetar a coleta e a confiabilidade dos dados, bem como o bem-estar dos participantes. Um dos riscos identificados é a possibilidade de desconforto ou constrangimento por parte dos alunos ao responderem aos testes conceituais, visto que estes podem gerar insegurança em relação ao próprio desempenho. Para mitigar este risco, será garantido aos participantes o direito de interromper sua participação a qualquer momento sem qualquer prejuízo. Adicionalmente, será oferecida a opção de responder às questões em um local ou momento mais apropriado, caso se sintam desconfortáveis.

Benefícios:

Aprofundamento da compreensão do conceito de Relatividade Geral;

Endereço: Rua Ferreira Pena, 1109 - Prédio da Reitoria, 2º andar, Manaus - AM
Bairro: CENTRO **CEP:** 69.025-010
UF: AM **Município:** MANAUS
Telefone: (92)98234-1140 **E-mail:** cepsh.pggi@ifam.edu.br

INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DO AMAZONAS -
IFAM



Continuação do Parecer: 7.896.807

Aumento do engajamento e melhoria das habilidades dos alunos;
Desenvolvimento do pensamento crítico;
Potencial para aplicação em outras áreas;
Melhora na transposição didática.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

Observa-se que os objetivos da pesquisa estão devidamente delimitados e apresentam coerência com o tipo de estudo proposto, revelando-se compatíveis e passíveis de serem alcançados a partir da metodologia apresentada.

A pesquisa poderá trazer contribuições educacionais relevantes para o ensino de Física em uma escola pública de Manaus, configurando-se como um estudo pertinente e viável de ser realizado.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Foram apresentados todos os documentos à avaliação ética da pesquisa, segundo Resoluções CNS n.º 466/12 e CNS n.º. 510/16.

Recomendações:

Cabe ao pesquisador responsável, após realização da pesquisa, apresentar a este colegiado o Relatório Final de Pesquisa, que será avaliado em reunião ordinária do comitê para verificação do cumprimento dos preceitos éticos na pesquisa com seres humanos.

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

O comitê, diante da análise dos autos com base nas resoluções CNS n.º 466/12 e CNS n.º. 510/16, decide pelo parecer de aprovado do projeto de pesquisa.

Contudo, faz-se necessária a correção do nome do CEPESH, que deve ser apresentado como "Comitê de Ética em Pesquisas com Seres Humanos", e não como "Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão de Saúde Humana", conforme consta no rodapé do TCLE e do TALE.

Cabe ao pesquisador responsável, após realização da pesquisa, apresentar a este colegiado o Relatório Final de Pesquisa, que será avaliado em reunião ordinária do comitê para verificação do cumprimento dos preceitos éticos na pesquisa com seres humanos.

Endereço: Rua Ferreira Pena, 1109 - Prédio da Reitoria, 2º andar, Manaus - AM
Bairro: CENTRO **CEP:** 69.025-010
UF: AM **Município:** MANAUS
Telefone: (92)98234-1140 **E-mail:** cepsh.ppgi@ifam.edu.br

INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DO AMAZONAS -
IFAM



Continuação do Parecer: 7.896.807

Considerações Finais a critério do CEP:

Cabe ao pesquisador responsável, após realização da pesquisa, apresentar a este colegiado o Relatório Final de Pesquisa, que será avaliado em reunião ordinária do comitê para verificação do cumprimento dos preceitos éticos na pesquisa com seres humanos.

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_2610278.pdf	26/09/2025 17:05:46		Aceito
Outros	CartaResposta.docx	26/09/2025 17:04:04	ELIABE RAFAEL FIGUEIRA CARDOSO	Aceito
Folha de Rosto	FolhaRosto.pdf	26/09/2025 17:03:05	ELIABE RAFAEL FIGUEIRA CARDOSO	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	ProjetoMestrado.docx	26/09/2025 17:01:48	ELIABE RAFAEL FIGUEIRA CARDOSO	Aceito
Declaração de Instituição e Infraestrutura	DeclaracaoInfraestrutura.pdf	26/09/2025 17:01:29	ELIABE RAFAEL FIGUEIRA CARDOSO	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TALE.docx	26/09/2025 16:59:26	ELIABE RAFAEL FIGUEIRA CARDOSO	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE.docx	26/09/2025 16:58:38	ELIABE RAFAEL FIGUEIRA CARDOSO	Aceito
Outros	QUESTIONARIOPREINTERVENCAO.pdf	03/08/2025 20:25:20	ELIABE RAFAEL FIGUEIRA CARDOSO	Aceito
Outros	QUESTIONARIOPOSINTERVENCAO.pdf	03/08/2025 20:25:02	ELIABE RAFAEL FIGUEIRA CARDOSO	Aceito
Declaração de concordância	CartadeAnueenciaEscola.pdf	03/08/2025 20:23:20	ELIABE RAFAEL FIGUEIRA CARDOSO	Aceito

Situação do Parecer:

Aprovado

Endereço: Rua Ferreira Pena, 1109 - Prédio da Reitoria, 2º andar, Manaus - AM
 Bairro: CENTRO CEP: 69.025-010
 UF: AM Município: MANAUS
 Telefone: (92)98234-1140 E-mail: cepsh.pggi@ifam.edu.br

INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DO AMAZONAS -
IFAM



Continuação do Parecer: 7.896.807

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

MANAUS, 10 de Outubro de 2025

Assinado por:
EDSON MAIA
(Coordenador(a))

APÊNDICE 6 - Produto Educacional

Guia Didático para o Professor

UM ANÁLOGO DE BURACOS NEGROS

**EXPLORANDO CONCEITOS BÁSICOS DE
RELATIVIDADE GERAL POR MEIO DO
PEER INSTRUCTION**

Autores: Eliabe Rafael Figueira Cardoso e José Anglada Rivera

Ficha Catalográfica

Biblioteca do IFAM – Campus Manaus Centro

C268g Cardoso, Eliabe Rafael Figueira.

Guia didático para o professor – um análogo de buracos negros: explorando conceitos básicos de relatividade geral por meio de Peer Instruction / Eliabe Rafael Figueira Cardoso, José Anglada Rivera. – Manaus, 2026.
68 p. : il. color.

Produto educacional proveniente da dissertação - Uso de um análogo mecânico de buracos negros associado a metodologia Peer Instruction no ensino de conceitos de relatividade geral Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física). – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus Centro; Universidade Federal do Amazonas, 2026.
ISBN 978-65-83758-45-3

1. Análogo mecânico. 2. Buracos Negros. 3. Peer Instruction. 4. Relatividade geral. I. Rivera, José Anglada. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. II. Universidade Federal do Amazonas. III. Título.

CDD 530.11

Elaborada por Márcia Auzier CRB 11/597

Autores:

Eliabe Rafael Figueira Cardoso

E-mail: figueiraeliabe@gmail.com

Prof. Dr. José Anglada Rivera

E-mail: jose.anglada@ifam.edu.br

Projeto gráfico e diagramação:

Eliabe Rafael Figueira Cardoso

Imagens:

CANVA



Apoio:



Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, em quem creio de forma genuína, por me conceder forças, discernimento e perseverança ao longo de toda essa caminhada.

Aos meus pais, Benedita Figueira e José Ribamar (in memoriam), expresso minha profunda gratidão pelo apoio, incentivo e por acreditarem na importância da minha formação; este trabalho também é uma forma de honrar a memória e o sonho de meu pai. Ao meu irmão Samuel, agradeço pelo companheirismo, incentivo constante e pela ajuda nas revisões gramaticais deste trabalho.

Ao meu orientador e autor, professor José Anglada, registro minhas sinceras gratidão pelas orientações claras, pela confiança e pela autonomia concedida durante o desenvolvimento da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001. Agradeço à CAPES, instituição fundamental para o fortalecimento da pós-graduação e da pesquisa científica no Brasil, a qual desempenha um papel decisivo na formação de pesquisadores.

Por fim, a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM, pelo apoio financeiro que possibilitou a realização desta pesquisa.

Ficha Técnica

Origem do Produto:

Este produto educacional intitulado "Método Peer Instruction no estudo de conceitos básico de Relatividade Geral" foi desenvolvido a partir da dissertação "Uso de um análogo mecânico de Buracos Negros associado a metodologia Peer Instruction no ensino de conceitos de Relatividade Geral" no Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), do Instituto e Universidade Federal do Amazonas (IFAM/UFAM).

Área de Conhecimento:

Ensino.

Categoria deste Produto:

Guia didático/instrucional.

Finalidade:

Contribuir com o ensino-aprendizagem de Relatividade Geral por meio de um análogo de buracos negros e o uso da metodologia Peer Instruction.

Público-Alvo:

Professores do Ensino Médio

Organização do Produto:

Este produto está dividido em 2 etapas: 1) fundamentação teórica visando o alinhamento das práticas de ensino de Relatividade Geral com os documentos oficiais para a Educação Básica no Brasil e as estratégias de ensino que visam nortear os professores; 2) Planejamento da proposta, sistematização dos conteúdos, estrutura das aulas, instrução do uso do PI em sala de aula, avaliação e sugestões de atividades.

Avaliação:

A avaliação do produto foi realizada primeiramente por um comitê ad hoc, formado por 5 professores de Física atuantes no Ensino Médio, sendo três com titulação de mestre e dois especialistas, todos com experiência em ensino de Ciências e familiaridade com metodologias ativas e/ou conteúdos de Física Moderna. Em seguida foi aplicado em duas turmas da 3ª série do Ensino Médio, totalizando 40 participantes. Também foi Aprovado pelo CEP/CONEP N°. do Parecer: 7.896.807

Divulgação:

Digital disponível em MNPEF (<https://www1.fisica.org.br/mnpef/repositorio/o/produtos-educacionais>)

Apoio Financeiro:

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM.

Cidade:

Manaus-AM

Idioma:

Português.

Ano:

2026.

Apresentação

Prezado(a) professor(a),

É com grande satisfação que apresentamos este guia didático, fruto de uma pesquisa de mestrado em Ensino de Física. Este material foi cuidadosamente elaborado com o objetivo de inovar a abordagem de temas complexos e, por vezes, distantes do cotidiano dos estudantes, como o fascinante universo dos buracos negros.

A proposta pedagógica aqui contida visa transcender o ensino tradicional, incentivando os alunos do ensino médio a se tornarem protagonistas de seu próprio aprendizado. Para isso, o método de Peer Instruction foi escolhido como pilar central, promovendo a interação e a construção coletiva do conhecimento por meio de discussões entre os pares.

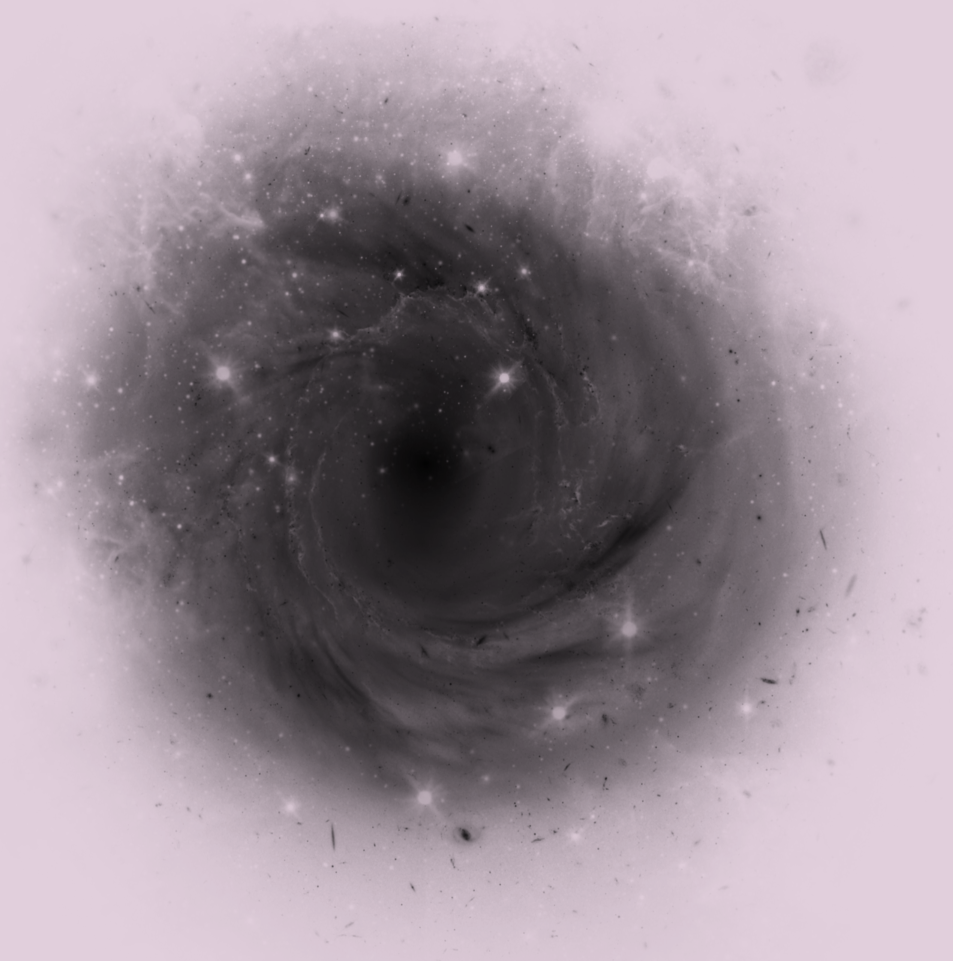
A sequência didática proposta neste guia, é estruturada em seis aulas para guiar os estudantes em uma jornada de descoberta, partindo da contextualização e despertando a curiosidade, passando pela compreensão dos conceitos fundamentais da Relatividade Geral e da física por trás da formação de Buracos Negros, até a aplicação do conhecimento em atividades avaliativas e reflexivas.

Esta guia didático é um convite à reflexão sobre novas práticas de ensino, que buscam engajar, motivar e, acima de tudo, capacitar os estudantes a pensar criticamente e a construir sua própria visão de mundo, utilizando a ciência como ferramenta para desvendá-lo.

Esperamos que este trabalho possa servir como inspiração e recurso valioso para educadores que, como nós, acreditam no potencial transformador de uma educação que coloca o aluno no centro do processo de ensino e aprendizagem.

Sumário

Introdução	7
Capítulo 1: Metodologias Ativas	9
Capítulo 2: Metodologia Peer Instruction	12
Capítulo 3: Concept Questions.....	19
Capítulo 4: Buracos Negros	24
Capítulo 5: Relatividade Geral	30
Capítulo 6: Sequência Didática	33
Considerações Finais	43
Apêndices	45
Referências Bibliográficas	66



INTRODUÇÃO

O presente produto, desenvolvido no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), tem como cerne a busca por abordagens pedagógicas inovadoras que tornem conceitos complexos da física moderna mais acessíveis e estimulantes para os estudantes do ensino médio. O problema de pesquisa central reside na dificuldade intrínseca de ensinar a Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein, um conteúdo que, embora proposto na Base Nacional Comum Curricular (BNCC), raramente integra o currículo regular de forma aprofundada.

Nesse contexto, este guia didático, intitulado "O Método Peer Instruction no estudo de conceitos básicos de Relatividade Geral: Um análogo dos Buracos Negros", surge como um produto educacional concebido para enfrentar esse desafio. Ele se propõe a ser uma ferramenta de apoio para professores que desejam introduzir o tema dos buracos negros e a curvatura do espaço-tempo de maneira interativa e significativa. A relevância deste material reside na sua proposta de superar a tradicional memorização de fórmulas, ao empregar a metodologia de Peer Instruction, um método que coloca o estudante no centro do processo de aprendizagem, promovendo a discussão, o raciocínio crítico e a construção coletiva do conhecimento. Com o auxílio de um análogo mecânico de baixo custo e o uso estratégico de testes conceituais, este guia oferece um roteiro prático e inovador, alinhado às competências e habilidades da BNCC, visando transformar a experiência de ensino e aprendizagem da Física em algo mais engajador e concreto.

Capítulo 1

METODOLOGIAS ATIVAS

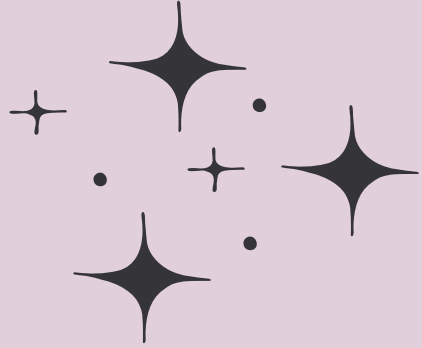


As Metodologias Ativas tem raízes no início do século XX, com influência do filósofo John Dewey (1978), que defendia uma educação baseada na experiência. Demoradamente, a sala de aula foi marcada por metodologias tradicionais, nas quais o professor ocupava o centro do processo educativo, transmitindo conhecimento enquanto o aluno assumia um papel passivo, apenas recebendo as informações, nesse processo o professor apresentava o conteúdo de forma pronta, e os alunos se limitavam a reproduzir o que era solicitado, sem espaço para participação ativa ou construção crítica do conhecimento (STUDART, 2019).

Há cerca de 40 anos, as MA emergiu no Brasil como uma resposta ao modelo tradicional de ensino, impulsionada por avanços nas pesquisas construtivistas e interacionistas, com o objetivo de fortalecer a aprendizagem significativa. Diversos pesquisadores destacam que essa abordagem tem suas bases nas teorias de Vygotsky (1896-1934), Ausubel (1918-2008), Paulo Freire (1921-1997) e outros, que defendiam o aluno como protagonista do processo de aprendizagem e o professor como mediador. Segundo esses teóricos, quanto mais ativo o aluno for em seu processo de ensino e aprendizagem, melhores serão os resultados. Assim, aumentaram as investigações sobre metodologias que promovem a atuação do aluno como agente ativo, dando origem às metodologias ativas (SANTOS et al., 2020).

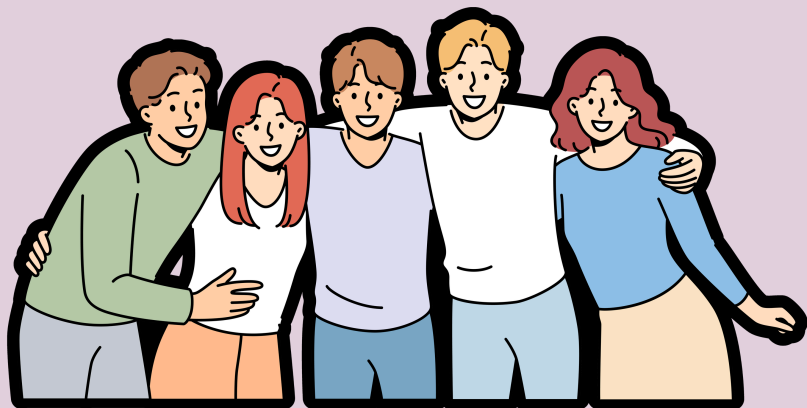
Segundo Santos et al. (2020), as concepções de Vygotsky estão presentes nas metodologias ativas, pois valorizam a relação não hierárquica e as interações sociais entre professor e aluno em sala de aula. Isso estimula o estudante a expressar suas opiniões, ouvir os outros e construir conhecimento de forma colaborativa com seus colegas, destacando o interacionismo no processo de aprendizagem. Da mesma forma, as estratégias ativas refletem as ideias do psicólogo David Ausubel, que defende que a aprendizagem é significativa "apenas quando os conteúdos escolares estão relacionados a conhecimentos prévios do estudante" (SANTOS et al., p. 73, 2020).

Capítulo 2



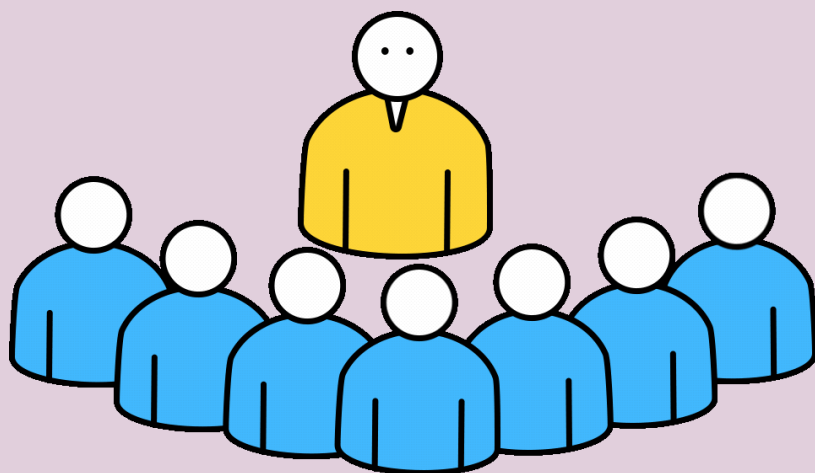
METODOLOGIA PEER INSTRUCTION





O método proposto por Eric Mazur, conhecido como Peer Instruction (Instrução por Pares), visa transformar a dinâmica das salas de aula, substituindo o modelo tradicional de aulas expositivas por uma abordagem mais interativa e centrada no aluno. O método foi desenvolvido por Mazur após ele perceber que seus alunos, apesar de se saírem bem em problemas quantitativos, tinham dificuldades em compreender conceitos básicos da física, isso o levou a questionar a eficácia do ensino tradicional, que prioriza a memorização de fórmulas e a resolução de problemas numéricos em detrimento da compreensão conceitual. A partir dessa reflexão, Mazur desenvolveu um método que incentiva os alunos a pensar criticamente e a discutir conceitos entre si, promovendo uma aprendizagem mais profunda e significativa (MAZUR, 1997).

O núcleo da PI é a utilização de testes conceituais durante as aulas que consistem em questões de múltipla escolha que abordam conceitos fundamentais da física. O processo é dividido em etapas: o professor faz uma breve exposição do conteúdo, apresenta um teste conceitual, os alunos respondem individualmente, discutem suas respostas com colegas e, finalmente, o professor explica a resposta correta (MAZUR, 1997). Esse ciclo de discussão e reflexão permite que os alunos confrontem suas ideias e concepções errôneas, promovendo uma compreensão mais sólida dos conceitos.





Mazur enfatiza que a PI não exige grandes investimentos tecnológicos ou mudanças radicais no currículo pois pode ser implementado com recursos simples, como cartões de resposta ou sistemas de votação eletrônica. Além disso, seu livro *Peer Instruction: A User's Manual* oferece uma série de recursos práticos, incluindo testes conceituais, questões de exames e testes de leitura, o qual embasou este trabalho.

O autor recomenda que os professores adotem a PI de forma gradual, começando com pequenas mudanças em suas aulas e avaliando os resultados. Ele também sugere que os professores motivem os alunos a ler o material antes das aulas, utilizando testes de leitura para garantir que os estudantes cheguem preparados para as discussões em sala. Além disso, ele enfatiza a importância de incluir questões conceituais nos exames, para reforçar a filosofia da PI e garantir que os alunos levem a sério a compreensão dos conceitos.

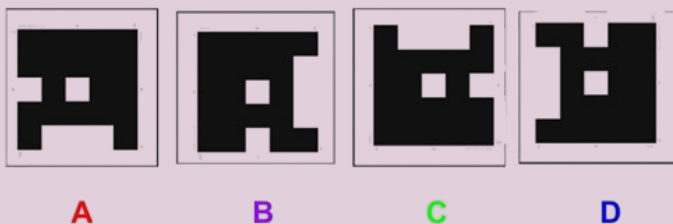
Plickers



Fonte: datarep

Para coletar as respostas dos alunos durante a aplicação do método Peer Instruction, você pode usar uma variedade de técnicas, desde métodos de baixa tecnologia até ferramentas digitais. A escolha do método depende da sua preferência, do número de alunos e dos recursos disponíveis. Em nosso trabalho, utilizamos o app Plickers, uma ferramenta muito prática para coletar respostas em sala de aula, pois combina a simplicidade de cartões de papel com a tecnologia de um smartphone ou tablet. Ele permite que você faça enquetes e perguntas de múltipla escolha sem a necessidade de um dispositivo para cada aluno.

Plickers

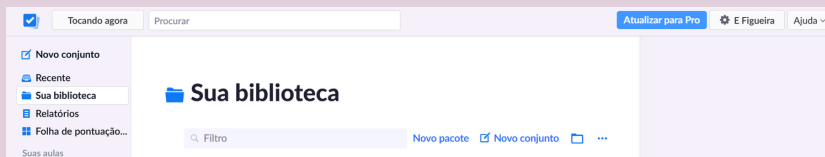


Fonte: Gopher Sport

Preparação (Antes da aula):

- Acesse o site: <https://www.plickers.com/signup>
- Crie sua conta: Acesse o site do Plickers e crie uma conta gratuita.
- Adicione sua turma: Na sua conta, crie uma ou mais turmas. Você pode adicionar os nomes dos seus alunos a essas turmas.
- Imprima os cartões: O Plickers gera um conjunto de cartões com um código QR único para cada aluno (geralmente numerado de 1 a 40). Imprima esses cartões. Cada cartão tem quatro lados, cada um representando uma opção de resposta (A, B, C, D). A resposta é determinada pela orientação do cartão.
- Crie as perguntas: No site ou no aplicativo, crie as perguntas de múltipla escolha (Concept Questions) que você planeja usar na aula. Você pode associá-las à turma que irá aplicá-las.

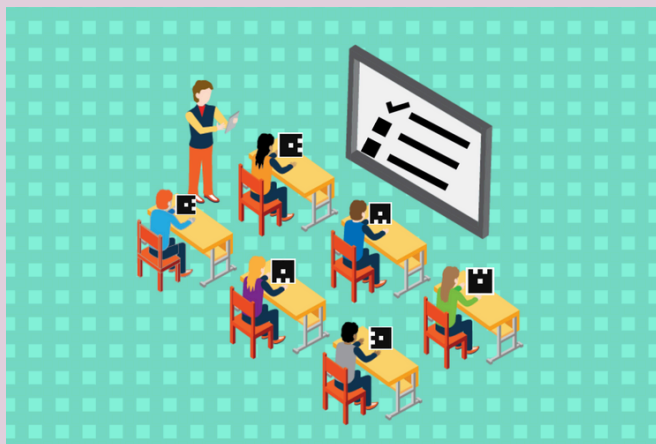
Layout inicial



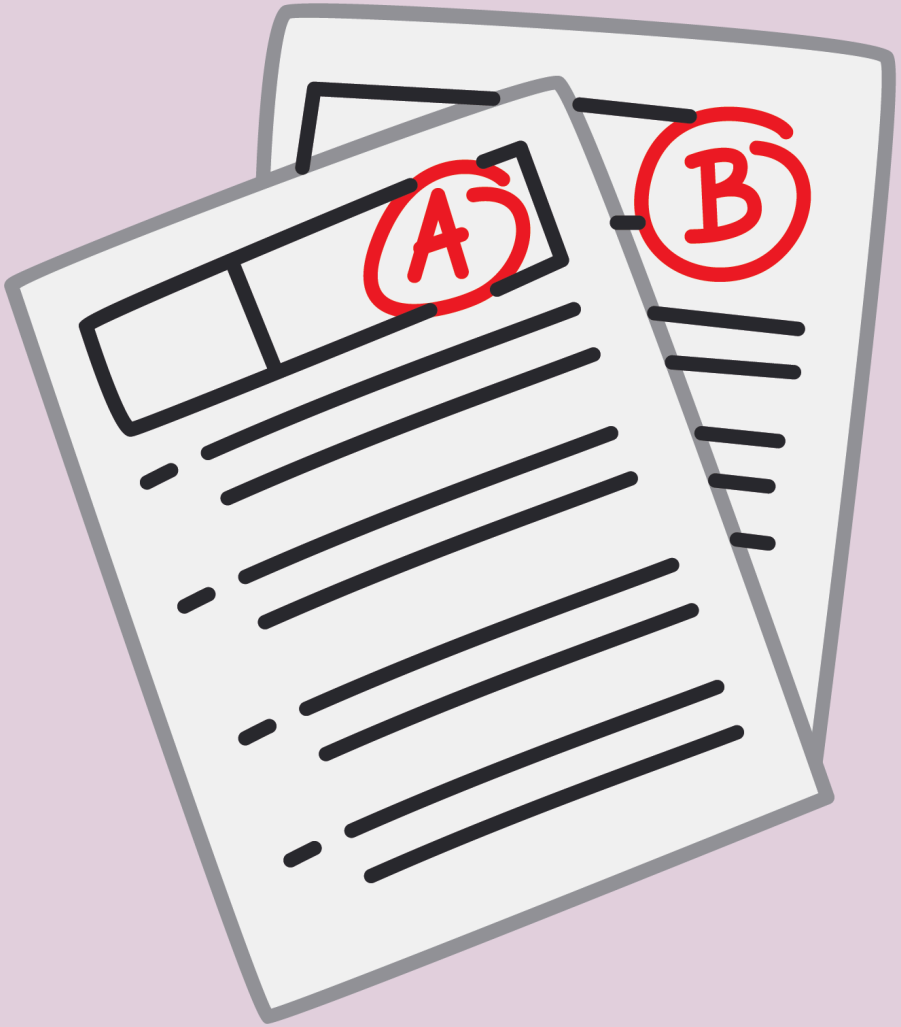
Fonte: autoria própria

Aplicação (Durante a aula):

- Distribua os cartões: Entregue a cada aluno um cartão numerado. O número do cartão deve corresponder ao seu nome na sua lista de turma no Plickers.
- Apresente a pergunta: Projete a Concept Question na tela para que todos os alunos possam vê-la.
- Peça para os alunos responderem: Os alunos devem escolher a resposta e levantar o cartão com a letra da sua escolha (A, B, C ou D) voltada para cima. A resposta correta não é visível para os outros, pois eles apenas veem o código QR.
- Colete as respostas: Usando o aplicativo Plickers no seu smartphone ou tablet, selecione a turma e a pergunta que está sendo feita. Aponte a câmera do seu dispositivo para a turma. O aplicativo escaneará os cartões levantados e identificará as respostas de cada aluno em tempo real.
- Exiba os resultados: Assim que você escanear os cartões, o aplicativo mostrará um gráfico com a distribuição das respostas da turma, sem revelar quem respondeu o quê. Isso permite que você avalie o entendimento da turma imediatamente.



Capítulo 4



CONCEPT QUESTIONS

Segundo Eric Mazur (1997), professor de Física em Harvard e criador da metodologia Peer Instruction, as questões conceituais (concept questions) são o cerne dessa abordagem de ensino. Elas são questões de múltipla escolha que têm como principal objetivo avaliar a compreensão dos alunos sobre conceitos fundamentais, e não apenas sua capacidade de memorizar fórmulas ou aplicar algoritmos.

- **Foco no conceito:** O principal diferencial é que elas não exigem cálculos complexos ou a memorização de equações. Em vez disso, focam em um único conceito-chave por vez, desafiando os alunos a aplicar a compreensão teórica a uma situação.
- **Múltipla escolha com distratores:** As questões são de múltipla escolha, mas as alternativas incorretas (distratores) são cuidadosamente elaboradas para representar erros conceituais comuns que os alunos costumam ter. Isso ajuda a identificar mal-entendidos específicos.
- **Não ambiguidade:** A questão deve ser clara e direta, sem dar margem a diferentes interpretações.
- **Dificuldade equilibrada:** Não devem ser muito fáceis nem excessivamente difíceis. O ideal é que a porcentagem de acertos iniciais esteja entre 30% e 70%, o que estimula a discussão.

Como elaborar testes conceituais?

Antes de começar a escrever, tenha em mente:

- **Avaliar a compreensão:** O objetivo primário é verificar se os alunos realmente entenderam o conceito, não se eles conseguem resolver um problema complexo.
- **Identificar equívocos:** Os distratores (opções incorretas) devem ser projetados para revelar mal-entendidos comuns.
- **Estimular a discussão:** A questão deve ser desafiadora o suficiente para gerar debate entre os alunos, mas não tão difícil que ninguém saiba o que fazer.
- **Foco em um único conceito:** Cada pergunta deve testar a compreensão de um conceito fundamental específico.

Antes de elaborar

- Revise o material que os alunos deverão estudar.
- Identifique os pontos mais difíceis ou os conceitos que os alunos historicamente têm mais dificuldade em compreender.
- Pense em analogias, situações do dia a dia ou cenários que possam ilustrar esse conceito.
- A pergunta deve ser formulada de forma clara, direta e concisa. Evite jargões desnecessários ou frases ambíguas.
- A questão não deve exigir cálculos demorados ou complexos. Se um cálculo for necessário, ele deve ser simples e servir apenas para ilustrar o conceito.
- Apresente o conceito dentro de um cenário ou problema concreto que o aluno possa visualizar.

Questões conceituais no Peer Instruction

As questões conceituais (concept question) são fundamentais na dinâmica da sala de aula na metodologia Peer Instruction:

Mini-Exposição: O professor apresenta um conceito de forma breve (7 a 10 minutos), sem entrar em detalhes excessivos ou deduções que já estejam disponíveis no material de estudo prévio.

Resposta individual: Em seguida, o professor projeta uma Concept question. Os alunos primeiro pensam individualmente e registram suas respostas (usando cards ou aplicativos). Isso os força a engajar com o material e a formar uma opinião própria. O professor verifica rapidamente a porcentagem de acertos.

Menos de 30% de acertos: Indica que o conceito não foi compreendido e o professor precisa revisitar a explicação, talvez de uma maneira diferente.

Entre 30% e 70% de acertos: É o “ponto ideal”. Nesse caso, o professor pede que os alunos discutam suas respostas com um colega (peer instruction), tentando convencer um ao outro da sua escolha.

Mais de 70% de acertos: Indica que a maioria compreendeu. O professor pode dar uma breve explicação da resposta correta e seguir para o próximo tópico.

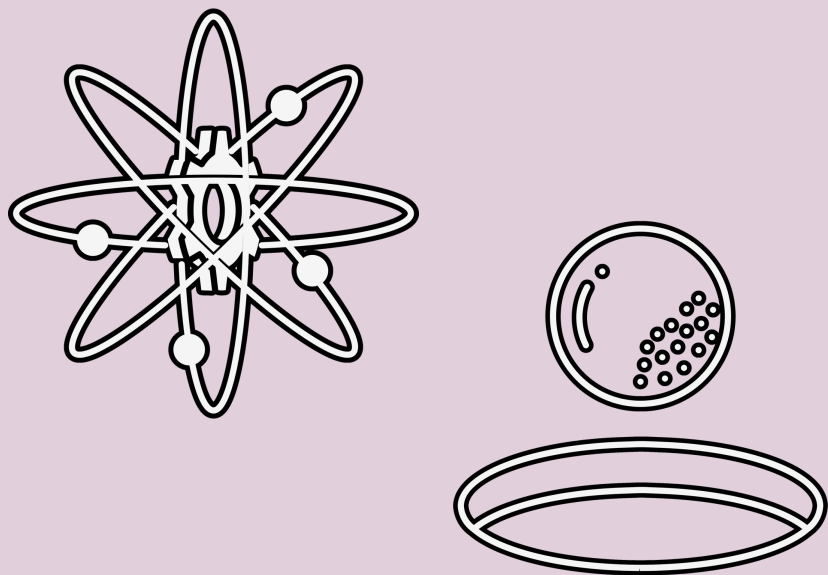
Capítulo 3

BURACOS

NEGROS

Os buracos negros são um dos objetos mais fascinantes e misteriosos do universo, oferecendo uma oportunidade única para introduzir conceitos fundamentais da Relatividade Geral de Albert Einstein no Ensino Médio (ALMEIDA e SOLTAU, 2022). De acordo com essa teoria, a gravidade não é uma força, como descrevia Newton na Física Clássica, mas uma curvatura no espaço-tempo causada pela presença de massa e energia assim, buracos negros, formados pelo colapso gravitacional de estrelas massivas, são regiões onde essa curvatura é tão extrema que nada, nem mesmo a luz, pode escapar (EINSTEIN, 1916), tal fenômeno desafia o conhecimento clássico e permite discutir ideias abstratas como dilatação do tempo e distorção espacial, e outros conceitos conectando a física moderna a conceitos clássicos dos estudantes.





Apesar de sua complexidade matemática, os buracos negros podem ser abordados de forma qualitativa no ensino médio (MORAIS, 2022), utilizando analogias e análogos práticos, como por exemplo, a ideia de um tecido deformado por uma bola pesada ou um funil com fluidos vazando, isto ajuda a visualizar como a massa curva o espaço-tempo ou como objetos são atraídos ao horizonte de evento, também é possível experimentos mentais como comparar o horizonte de eventos a um rio cuja correnteza se torna impossível de superar após uma certa queda d'água. Essas metáforas facilitam a compreensão de fenômenos como a singularidade, onde as leis da física convencional deixam de valer, estimulando o pensamento crítico e a curiosidade científica.

Os buracos negros, enquanto tema da Física Moderna, estão alinhados à BNCC (Base Nacional Comum Curricular) no eixo de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, especialmente na habilidade EM13CNT304, que prevê a análise de fenômenos cósmicos e tecnologias associadas à exploração espacial, como ondas gravitacionais e relatividade geral (BRASIL, 2017), ela incentiva a abordagem de conceitos que conectem a ciência contemporânea ao cotidiano, promovendo o pensamento crítico e a compreensão do universo.

No Referencial Curricular Amazonense, ressalta que, no âmbito das Ciências da Natureza e suas Tecnologias, o saber conceitual deve ser organizado por meio de princípios, teorias e representações modelares, no qual os fundamentos da investigação científica, estão intrinsecamente relacionados à construção, compreensão e utilização de modelos que explicam fenômenos da natureza e tecnologias, especificamente no ensino de Física, é essencial que os alunos desenvolvam capacidades para compreender e refletir sobre situações do dia a dia como, introdução a conceitos cosmológicos, como Buracos Negros e o Big Bang, que ajudam a explicar a formação e a evolução do Universo (AMAZONAS, 2020).

O estudo de buracos negros no Ensino Médio serve como ponte para reflexões interdisciplinares, envolvendo astronomia, filosofia e até ficção científica. Questões como “O que acontece dentro de um buraco negro?” ou “É possível viajar no tempo através deles?” incentivam debates sobre os limites do conhecimento humano e a natureza do universo. Ao contextualizar a Relatividade Geral com objetos cósmicos reais, os educadores podem despertar o interesse pela física moderna, preparando os alunos para compreender os avanços científicos do século XXI e inspirando futuros pesquisadores.



Análogo Mecânico de Buracos Negros Proposto



Fonte: Próprio autor

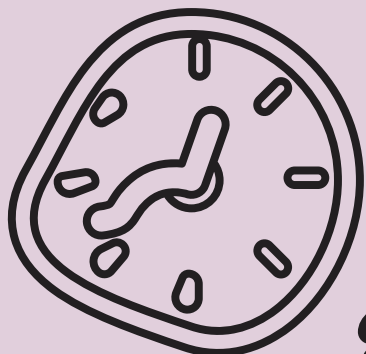
Este experimento utiliza um análogo mecânico para ilustrar características de buracos negros de forma visual e intuitiva. A analogia se baseia na similaridade entre a atração gravitacional e a força da areia que flui para um dreno. No nosso caso, o dreno atua como o “buraco negro” e a areia circulante como o “espaço-tempo”.

Materiais Necessários

- Garrafa plástica grande (recipiente superior).
- Garrafa plástica menor (recipiente inferior).
- Tubo ou mangueira.
- Estrutura de madeira para suporte.
- Areia.
- Pequenos objetos flutuantes (ex: pequenas bolinhas de isopor).

Capítulo 5

RELATIVIDADE GERAL



$$E = mc^2$$

O ESPAÇO-TEMPO

A concepção de espaço-tempo, introduzida por Albert Einstein em sua Teoria da Relatividade Geral em 1915, revolucionou o entendimento científico sobre a estrutura do universo, que muito diferente da visão newtoniana, tratava espaço e tempo como entidades absolutas e independentes, Einstein propôs que ambos estão intrinsecamente interligados, formando um contínuo quadridimensional (três dimensões espaciais e uma temporal) (EINSTEIN, 2024). Nesse modelo, a presença de massa e energia curva o espaço-tempo, alterando a trajetória de objetos e até mesmo o fluxo do tempo, tal abordagem permitiu explicar fenômenos como a órbita dos planetas e a deflexão da luz por corpos massivos, marcando um paradigma na física moderna.

A compreensão da gravidade como manifestação da curvatura do espaço-tempo constitui uma das maiores contribuições da Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein. Publicada em 1916, essa teoria revolucionária substituiu o conceito newtoniano de gravidade como força atrativa pela ideia de que corpos massivos deformam a estrutura quadridimensional do universo, alterando o movimento de objetos e a passagem do tempo. Essa abordagem geométrica unificou espaço e tempo em um único contínuo dinâmico, onde a trajetória dos corpos é determinada pela curvatura local do espaço-tempo, explicando fenômenos que a física clássica não conseguia abordar adequadamente (EINSTEIN, 1916).

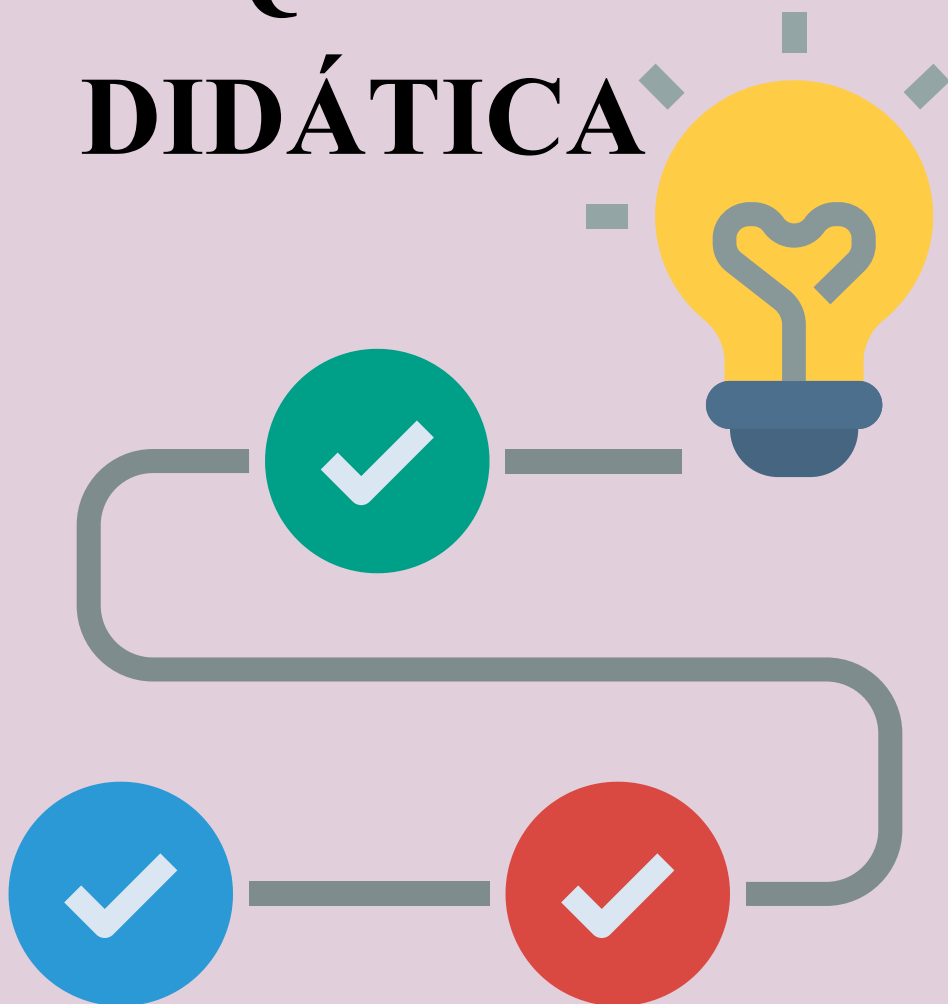
DILATAÇÃO DO TEMPO GRAVITACIONAL

A dilatação do tempo gravitacional representa uma das previsões mais fascinantes da Teoria da Relatividade Geral de Einstein, demonstrando que o fluxo do tempo não é absoluto, mas varia de acordo com o potencial gravitacional local. Segundo esse princípio, relógios situados em regiões de maior campo gravitacional (próximos a corpos massivos) avançam mais lentamente em comparação com relógios em regiões de menor curvatura espaço-temporal. Esse efeito, inicialmente considerado contra-intuitivo, foi rigorosamente confirmado por experimentos de alta precisão e possui implicações práticas significativas em tecnologias modernas, como os sistemas de posicionamento global (GPS). Esse efeito, embora mínimo no cotidiano, é crucial para tecnologias modernas e comprova que tempo e espaço são relativos, dependendo do referencial gravitacional.

O fundamento físico da dilatação temporal gravitacional decorre diretamente do princípio de equivalência einsteiniano, que estabelece a indistinguibilidade local entre um campo gravitacional e um sistema acelerado. Matematicamente, o fenômeno é descrito pela métrica de Schwarzschild, que mostra como o intervalo de tempo próprio (τ) medido por um observador em repouso num campo gravitacional relaciona-se com o tempo coordenado (t) (EINSTEIN, 1916). Essa relação prediz que, para um observador distante, processos físicos próximos a um objeto massivo parecerão ocorrer em câmera lenta, efeito que se torna extremamente pronunciado nas proximidades de corpos compactos como estrelas de nêutrons e buracos negros.

Capítulo 6

SEQUÊNCIA DIDÁTICA



Componente Curricular: Física

Ano/Série: 3ª Série

Duração: 6 aulas de 45min

Metodologias: Alinhamento Construtivo, Peer Instruction.

OBJETIVOS DE ENSINO:

- Introduzir conceitos básicos da Relatividade Geral por meio de um análogo de buracos negros.
- Promover a compreensão de fenômenos complexos da Física de forma acessível e interativa.
- Desenvolver o pensamento crítico e a capacidade de argumentação científica.
- Estimular o trabalho colaborativo e a autoavaliação dos estudantes.
- Conectar o conhecimento científico com a realidade e o cotidiano dos alunos.

COMPETÊNCIAS GERAIS DA EDUCAÇÃO BÁSICA:

- **Competência 01:** Valorizar e utilizar os conhecimentos historicamente construídos sobre o mundo físico, social, cultural e digital para entender e explicar a realidade, continuar aprendendo e colaborar para a construção de uma sociedade justa, democrática e inclusiva.
- **Competência 02:** 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.

COMPETÊNCIAS ESPECÍFICAS DE CIÊNCIAS DA NATUREZA E SUAS TECNOLOGIAS PARA O ENSINO MÉDIO:

Competência 1: Analisar fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas interações e relações entre matéria e energia, para propor ações individuais e coletivas que aperfeiçoem processos produtivos, minimizem impactos socioambientais e melhorem as condições de vida em âmbito local, regional e global.

Competência 2: Analisar e utilizar interpretações sobre a dinâmica da Vida, da Terra e do Cosmos para elaborar argumentos, realizar previsões sobre o funcionamento e a evolução dos seres vivos e do Universo, e fundamentar e defender decisões éticas e responsáveis.

Competência 03: Investigar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais, e comunicar suas descobertas e conclusões a públicos variados, em diversos contextos e por meio de diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC).

HABILIDADES:

(EM13CNT101) Analisar e representar, com ou sem o uso de dispositivos e de aplicativos digitais específicos, as transformações e conservações em sistemas que envolvam quantidade de matéria, de energia e de movimento para realizar previsões sobre seus comportamentos em situações cotidianas e em processos produtivos.

(EM13CNT201) Analisar e discutir modelos, teorias e leis propostos em diferentes épocas e culturas para comparar distintas explicações sobre o surgimento e a evolução da Vida, da Terra e do Universo com as teorias científicas aceitas atualmente.

(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.

(EM13CNT209) Analisar a evolução estelar associando-a aos modelos de origem e distribuição dos elementos químicos no Universo, compreendendo suas relações com as condições necessárias ao surgimento de sistemas solares e planetários, suas estruturas e composições e as possibilidades de existência de vida, utilizando representações e simulações.

ESTRUTURA DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A sequência didática será dividida em 6 aulas, com cada etapa focando em um aspecto do tema, utilizando o método Peer Instruction para promover a interação e a construção coletiva do conhecimento e desenvolver habilidades específicas.

Aula 1:

Objetivo de Aprendizagem:

- Despertar a curiosidade sobre o universo e os fenômenos astronômicos, especialmente sobre Buracos Negros;
- Entender como se dá a formação de um buraco negro.

Habilidade:

(EM13CNT209)

Atividades de Ensino e Aprendizagem:

- Início (5min): Entregar um diário de bordo para preenchimento individual de cada aula.
- Desenvolvimento (30min): Lançar a pergunta: “O que vocês sabem sobre buracos negros? O que gostariam de saber?” para ativar o conhecimento prévio e a curiosidade. Após, aplicar um teste conceitual sobre conceitos básicos de Relatividade Geral.
- Fechamento (10min): Apresentar vídeos sobre o universo (galáxias, estrelas, formação de buracos negros). Outros vídeos podem ser enviados aos alunos para serem assistidos em casa.
- Sugestão
 1. vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=hwKIwHi9peU>
 2. vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=Jz-9bVWRfVw>

Aula 2:

Objetivo de Aprendizagem:

Analisar fenômenos relacionados aos Buracos Negros;
Conhecer características fundamentais de um buraco negro.

Habilidade:

(EM13CNT204)

Atividades de Ensino e Aprendizagem:

- **Início (15min):** Fazer uma revisão sobre os vídeos assistidos na aula anterior, destacando a formação de buracos negros. Pode-se mostrar buracos negros já nomeados.
- **Desenvolvimento (30min):** Apresentar uma Concept Question para introduzir uma discussão acerca da formação e características de um buraco negro visto no vídeo e na apresentação do professor. O professor pode utilizar slides para reforçar sua explicação sobre características de buracos negros, como: Horizonte de Eventos, Disco de Acreção; Zona de Mergulho e Singularidade, bem como utilizar o análogo mecânico para ilustrar cada característica.
- Ao aplicar a Concept Question, seguir as etapas do PI de acordo com a porcentagem de acertos:
 1. Os alunos votam individualmente. Se o número de acertos for menor que 30%, o professor faz uma nova explicação direcionada à Concept Question.
 2. Se o número de acertos for entre 30% e 70%, o professor pede para os alunos discutirem em pares, justificando suas respostas.
 3. Se o número de acertos for maior que 70%, significa que a maioria compreendeu o conceito. O professor fornece um feedback geral, esclarecendo o conceito e passa para o próximo tópico ou próxima Concept Question.

Aula 3:

Objetivos de Aprendizagem:

Revisitar o conceito de gravidade de Newton.

Introduzir a ideia de espaço-tempo e sua curvatura por massas.

Habilidade:

(EM13CNT201)

Atividades de Ensino e Aprendizagem:

- Início (15min): Resgatar o conceito de gravidade newtoniana por meio de uma breve discussão ou perguntas dirigidas para verificar os conhecimentos prévios dos alunos acerca de força gravitacional, peso, inércia, etc.
- Desenvolvimento (30min): Realizar um experimento demonstrativo utilizando o análogo mecânico para ilustrar a curvatura do espaço-tempo no qual as esferas se movimentam no vórtice do funil em direção a “singularidade”. Em seguida, apresentar uma Concept Question para desenvolvimento do conceito de Gravidade na física moderna.

IMPORTANTE: Toda vez que apresentar uma nova Concept Question, seguir as etapas do Peer Instruction, de acordo a porcentagem de acertos mencionados na aula 02.

SUGESTÃO: Deixar como tarefa de casa vídeos curtos e introdutórios sobre Relatividade Geral.

- Sugestão

1. vídeo 1: <https://www.youtube.com/watch?v=fwzzgJOLZkM>

2. vídeo 2: <https://www.youtube.com/watch?v=jYlr3G9yB8s>

3. vídeo 3: <https://www.youtube.com/watch?v=KU7l4nOQiDo>

4. vídeo 4: <https://www.youtube.com/watch?v=pF1tQzPI6vI>

Aula 4:

Objetivos de Aprendizagem:

Apresentar os postulados de Einstein para a Relatividade Geral (Princípio da Equivalência e Princípio da Covariância Geral).

Abordar, de forma qualitativa, a dilatação do tempo em campos gravitacionais fortes.

Habilidade:

(EM13CNT201)

Atividades de Ensino e Aprendizagem:

- **Início (10min):** Relembrar a curvatura do espaço-tempo e a influência da massa. Fazer perguntas relacionadas aos vídeos apresentados para assistirem em casa e caso não expressem terem assistido, colocar um dos vídeos para verem em sala.
- **Desenvolvimento (30min):** Mostrar as definições de Einstein sobre o conceito de espaço-tempo. Em seguida, aplicar de forma qualitativa em situações hipotéticas esses postulados, por exemplo, sobre a passagem do tempo perto de um buraco negro. O professor pode utilizar slides que resumam os dois postulados e fazer uma conexão com os vídeos deixados na última aula. Em seguida, apresentar uma Concept Question a cerca dos postulados e da dilatação do tempo em campos gravitacionais fortes.
- **Fechamento (5min):** Síntese dos efeitos temporais próximos a buracos negros, utilizando o análogo mecânico com as esferas se movendo no vórtice do funil ilustrando a passagem do tempo a medida que se aproxima do horizonte de eventos.

Aula 5:

Objetivo de Aprendizagem:

Explorar as características de um buraco negro real e seu análogo.

Habilidade:

(EM13CNT101)

Atividades de Ensino e Aprendizagem:

- **Início (10min):** Retomar a discussão sobre buracos negros, lançando a pergunta: “Se não podemos ir a um buraco negro, como podemos estudá-los?”.
- **Desenvolvimento (30min):** Apresentar o conceito de “análogo de buraco negro”, explicando como esses sistemas se comportam de maneira semelhante/ilustrativas a um buraco negro real em certos aspectos. Utilizar o análogo mecânico proposto. Apresentar uma Concept Question.: Exemplo: “Estudar um análogo de buraco negro é vantajoso porque...”
- Os alunos votam na sua resposta e o professor segue a estratégia do Peer Instruction.
- **Fechamento (5min):** O professor conclui essa aula falando sobre a importância dos análogos na pesquisa científica e na compreensão de fenômenos complexos.

Aula 6:

Objetivos de Aprendizagem:

Aplicar o conhecimento adquirido, em um teste conceitual.

Analisar os diários de bordo.

Sintetizar o aprendizado da sequência didática.

Habilidade:

(EM13CNT301)

Atividades de Ensino e Aprendizagem:

- Início (10min): Compartilhamento das observações e discussões em plenária. Utilizar os diários de bordo.
- Desenvolvimento (35min): Aplicação do teste conceitual.

AVALIAÇÃO SOMATIVA

A avaliação somativa se dará por meio do teste conceitual final valendo 10,0pts.

AVALIAÇÃO FORMATIVA

A avaliação formativa acontecerá durante o desenvolvimento do Peer Instruction, ao longo do processo de ensino e aprendizagem do aluno, quando forem responder as Concept Question será possível avaliar o desempenho por meio do Plickers bem como identificar as dificuldades durante as discussões em pares. Também será avaliado a discussão em plenária e anotações dos diários de bordo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS



O percurso desta pesquisa e a elaboração deste guia didático culminam na consolidação de uma proposta pedagógica sólida e aplicável para o ensino de conceitos de Relatividade Geral no ensino médio. Ao longo das seis aulas da sequência didática, o objetivo de introduzir os conceitos de buracos negros e a curvatura do espaço-tempo por meio do Peer Instruction e de um análogo mecânico mostrou-se viável e promissor. As contribuições deste guia são multifacetadas e se manifestam em diferentes níveis:

Em primeiro lugar, o material oferece um referencial teórico e prático para a implementação do Peer Instruction, detalhando as etapas e sugerindo ferramentas como o aplicativo Plickers, o que desmistifica o uso da metodologia para professores que buscam inovar em suas aulas. Em segundo lugar, o desenvolvimento do análogo mecânico de buracos negros representa uma contribuição significativa, pois oferece uma ferramenta tátil e visual para que os estudantes possam, de fato, “ver” e interagir com o fenômeno da curvatura do espaço-tempo, tornando um conceito abstrato em algo tangível. Por fim, o modelo de diário de bordo atua como uma contribuição direta para a avaliação formativa e a metacognição dos alunos, permitindo que eles reflitam sobre sua própria aprendizagem.

Esperamos que este guia didático não seja apenas um documento de pesquisa, mas uma ferramenta viva, capaz de inspirar e capacitar professores a desafiar as fronteiras do ensino tradicional de Física, fomentando uma geração de estudantes mais curiosa, crítica e entusiasmada com as maravilhas do universo.



APÊNDICES

Diário de Bordo

DIÁRIO DE BORDO DE FÍSICA

Professor: _____

Estudante: _____

Turma: _____ **Data:** _____

Número da Aula: _____

Tema da Aula: _____

Fichamento:

1. _____
2. _____
3. _____
4. _____
5. _____
6. _____
7. _____
8. _____
9. _____
10. _____

Análise das Concept Questions:

Minha resposta inicial: _____

Discussão em pares: _____

Minha nova resposta: _____

Conclusão do professor: _____

Dúvidas e Reflexões:

Concept Questions para Aula 02

1. Onde podemos encontrar a maioria dos buracos negros conhecidos no universo?

- a) Flutuando livremente no espaço vazio entre as galáxias.
- b) No centro da maioria das galáxias, incluindo a Via Láctea.
- c) Ao redor de planetas gasosos gigantes.
- d) Principalmente dentro de nebulosas de gás e poeira.

Resposta correta: b) No centro da maioria das galáxias, incluindo a Via Láctea.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta visa ativar o conhecimento prévio dos alunos sobre a estrutura do universo e galáxias. A discussão deve focar na ideia de que buracos negros supermassivos são componentes comuns nos centros galácticos, como Sagitário A* na nossa Via Láctea. Pode-se questionar por que eles estariam ali (grande concentração de massa) e se todos os buracos negros são supermassivos.

2. Qual é a principal característica que define um buraco negro e o torna tão misterioso?

- a) Sua cor escura e brilhante.
- b) A capacidade de viajar no tempo.
- c) Sua gravidade é tão intensa que nada, nem mesmo a luz, pode escapar.
- d) Eles emitem ondas sonoras muito fortes.

Resposta correta: c) Sua gravidade é tão intensa que nada, nem mesmo a luz, pode escapar.

Sugestão de discussão para o professor: Essa é uma pergunta fundamental para introduzir o conceito central de um buraco negro: o horizonte de eventos e a fuga da luz. A discussão deve esclarecer que a cor escura não é intrínseca, mas sim devido à ausência de luz que se propaga dele, e desmistificar ideias fantasiosas sobre viagens no tempo ou sons no vácuo.

3. Qual tipo de objeto celeste é o estágio final da vida de uma estrela de massa muito alta, que pode levar à formação de um buraco negro?

- a) Anã branca.
- b) Estrela de nêutrons.
- c) Supernova.
- d) Nebulosa planetária.

Resposta correta: b) Estrela de nêutrons.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta explora a sequência de eventos estelares. É importante diferenciar a supernova (o evento explosivo) do remanescente (estrela de nêutrons ou buraco negro). O professor pode guiar a discussão sobre a relação entre a massa da estrela original e o tipo de remanescente (anã branca para estrelas de baixa massa, estrela de nêutrons para médias, buraco negro para altas).

4. O que acontece com o núcleo de uma estrela massiva imediatamente antes de ela colapsar e formar um buraco negro?

- a) Ele se expande e se resfria.
- b) Ele começa a fundir elementos mais leves como hidrogênio e hélio.
- c) Ele sofre um colapso gravitacional rápido e se torna extremamente denso.
- d) Ele se desintegra completamente em partículas elementares.

Resposta correta: c) Ele sofre um colapso gravitacional rápido e se torna extremamente denso.

Sugestão de discussão para o professor: Esta questão foca no processo imediato de formação. A discussão deve enfatizar o papel da gravidade em superar a pressão interna que sustentava a estrela. “Desintegrar” ou “expandir” são distratores que representam o oposto do colapso.

5. Por que os buracos negros “normais” (estelares) são tão difíceis de observar diretamente?

- a) Eles são muito pequenos.
- b) Eles se movem muito rapidamente.
- c) Não emitem nem refletem luz.
- d) Estão sempre cobertos por nuvens de poeira cósmica.

Resposta correta: c) Não emitem nem refletem luz.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta aborda a dificuldade de detecção. O professor pode discutir as formas indiretas de detecção (efeitos gravitacionais em estrelas próximas, emissão de raios-X de material caindo). A discussão deve reforçar o conceito de que, embora pequenos em comparação com estrelas, o principal problema é a ausência de luz.

6. Quando uma estrela massiva esgota seu “combustível” nuclear, qual força se torna dominante e faz com que ela comece a colapsar?

- a) Força eletromagnética.
- b) Força nuclear forte.
- c) Força gravitacional.
- d) Força de repulsão quântica.

Resposta correta: c) Força gravitacional.

Sugestão de discussão para o professor: Essa pergunta é essencial para entender a dinâmica de formação. A discussão deve explicar que enquanto a estrela está ativa, a pressão da fusão nuclear equilibra a gravidade. Quando o combustível acaba, a gravidade vence, levando ao colapso.

7. O que é o “horizonte de eventos” de um buraco negro?

- a) A superfície sólida do buraco negro.
- b) O ponto a partir do qual nada, nem mesmo a luz, pode escapar da gravidade do buraco negro.
- c) A região onde novas estrelas estão nascendo.
- d) Uma órbita segura ao redor do buraco negro.

Resposta correta: b) O ponto a partir do qual nada, nem mesmo a luz, pode escapar da gravidade do buraco negro.

Sugestão de discussão para o professor: Esta é uma das definições mais importantes para buracos negros. A discussão deve enfatizar que não é uma superfície física, mas sim um limite sem retorno determinado pela intensidade da gravidade. Pode-se usar analogias, como a de uma cachoeira onde a água se move tão rápido que um barco não consegue mais remar contra a corrente.

8. Por que é fundamental para a formação de um buraco negro que a estrela original seja massiva?

- a) Estrelas massivas brilham mais forte e vivem mais tempo.
- b) Apenas estrelas massivas possuem hidrogênio suficiente para queimar.
- c) Somente estrelas com grande massa possuem gravidade interna forte o suficiente para superar a pressão e colapsar completamente após a morte.
- d) Estrelas massivas são as únicas que podem formar planetas.

Resposta correta: c) Somente estrelas com grande massa possuem gravidade interna forte o suficiente para superar a pressão e colapsar completamente após a morte.

Sugestão de discussão para o professor: A massa é o fator determinante. A discussão deve reforçar que estrelas menos massivas, como o Sol, não têm gravidade interna suficiente para continuar o colapso além de um certo ponto, formando anãs brancas ou estrelas de nêutrons, que possuem outros mecanismos de pressão para se sustentar.

9. Se você observasse uma pessoa caindo em um buraco negro, de uma distância segura, o que você veria acontecer com ela à medida que se aproxima do horizonte de eventos?

- a) Ela desapareceria instantaneamente.
- b) Ela ficaria mais brilhante e aceleraria rapidamente.
- c) Ela pareceria desacelerar e sua imagem se “congelaria” antes de cruzar o horizonte de eventos.
- d) Ela mudaria de cor para vermelho.

Resposta correta: c) Ela pareceria desacelerar e sua imagem se “congelaria” antes de cruzar o horizonte de eventos.

Sugestão de discussão para o professor: Esta é uma questão sobre a dilatação gravitacional do tempo (abordada na Aula 4 do da SEA). A discussão deve explicar que, para um observador externo, o tempo parece desacelerar para quem está caindo, e a luz emitida pelo objeto se torna cada vez mais avermelhada (desvio para o vermelho gravitacional) até desaparecer.

10. Qual a principal diferença entre um buraco negro estelar e um buraco negro supermassivo?

- a) Buracos negros estelares são muito mais antigos que os supermassivos.
- b) A massa: buracos negros supermassivos possuem milhões ou bilhões de vezes a massa do Sol, enquanto os estelares possuem algumas dezenas de massas solares.
- c) Buracos negros estelares emitem mais radiação.
- d) Apenas buracos negros supermassivos são formados a partir do colapso de estrelas.

Resposta correta: b) A massa: buracos negros supermassivos possuem milhões ou bilhões de vezes a massa do Sol, enquanto os estelares possuem algumas dezenas de massas solares.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta visa consolidar a compreensão sobre os diferentes tipos de buracos negros. A discussão deve focar na diferença de massa e, possivelmente, nas diferentes teorias de formação (estrelas massivas para estelares vs. acumulação de gás/fusão para supermassivos). O distrator “d” pode ser usado para reforçar que buracos negros estelares são formados por estrelas.

Concept Questions para Aula 03

1. De acordo com a Lei da Gravitação Universal de Isaac Newton, o que acontece com a força gravitacional entre dois objetos se a distância entre eles dobrar?

- a) A força quadruplica.
- b) A força dobra.
- c) A força reduz-se pela metade.
- d) A força reduz-se a um quarto do valor original.

Resposta correta: d) A força reduz-se a um quarto do valor original.

Sugestão de discussão para o professor: A discussão deve reforçar que a gravidade newtoniana é uma força de atração que diminui rapidamente com o aumento da distância.

2. Qual das seguintes afirmações melhor descreve a gravidade segundo Isaac Newton?

- a) É uma força de atração entre corpos com massa, que age instantaneamente a distância.
- b) É uma distorção no tecido do espaço-tempo causada pela presença de massa.
- c) É uma energia que empurra os objetos uns para longe dos outros.
- d) É uma ilusão causada pelo movimento dos planetas.

Resposta correta: a) É uma força de atração entre corpos com massa, que age instantaneamente a distância.

Sugestão de discussão para o professor: Esta questão diferencia a visão newtoniana da visão da Relatividade Geral. A discussão deve focar na “ação à distância” de Newton e na ideia de que a gravidade é uma força em sua teoria, contrastando com a curvatura do espaço-tempo que virá a seguir.

3. Imagine que você joga uma bola para cima. Segundo a gravidade de Newton, o que faz a bola cair de volta para a Terra?

- a) A bola se choca com o teto invisível da atmosfera.
- b) A Terra exerce uma força de atração sobre a bola.
- c) A bola perde sua energia de movimento e desintegra.
- d) O espaço-tempo está curvo ao redor da Terra, e a bola segue essa curvatura.

Resposta correta: b) A Terra exerce uma força de atração sobre a bola.

Sugestão de discussão para o professor: A discussão deve se concentrar na ideia de que a Terra “puxa” a bola, e não em outras explicações alternativas. O distrator “d” já introduz a ideia da Relatividade, preparando o terreno para a próxima parte da aula.

4. A ideia de que “massas curvam o espaço-tempo” é central para qual teoria da gravidade?

- a) Lei da Gravitação Universal de Newton.
- b) Teoria da Relatividade Especial de Einstein.
- c) Teoria da Relatividade Geral de Einstein.
- d) Teoria do Big Bang.

Resposta Correta: c) Teoria da Relatividade Geral de Einstein.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta introduz o conceito-chave da Relatividade Geral. A discussão deve esclarecer que a Relatividade Especial lida com movimento em velocidades próximas à luz, mas não com gravidade.

5. Se o espaço-tempo é como um “tecido” flexível, o que causaria uma “curvatura” nesse tecido?

- a) A presença de energia escura.
- b) A velocidade de um objeto em movimento.
- c) A presença de massa e energia.
- d) A expansão do universo.

Resposta correta: c) A presença de massa e energia.

Sugestão de discussão para o professor: Esta questão usa a analogia do “tecido” do espaço-tempo. É importante que os alunos compreendam que não é apenas a massa, mas também a energia que contribui para essa curvatura. O professor pode usar o análogo mecânico para ilustrar.

6. Como a curvatura do espaço-tempo explica a órbita da Terra ao redor do Sol, segundo a Relatividade Geral?

- a) O Sol puxa a Terra diretamente com uma força gravitacional.
- b) A Terra está seguindo uma "linha reta" em um espaço-tempo curvo causado pelo Sol.
- c) A Terra é empurrada pelo vento solar.
- d) Existe uma corda invisível ligando a Terra ao Sol.

Resposta correta: b) A Terra está seguindo uma "linha reta" em um espaço-tempo curvo causado pelo Sol.

Sugestão de discussão para o professor: Esta é uma questão crucial para a mudança de paradigma da gravidade. A discussão deve enfatizar que, na Relatividade Geral, a órbita não é resultado de uma força, mas sim do caminho mais curto (geodésica) que um objeto percorre em um espaço-tempo deformado pela massa do Sol.

7. Se um buraco negro é extremamente massivo, como ele afeta o espaço e o tempo em suas proximidades, de acordo com a Relatividade Geral?

- a) Apenas o espaço é afetado, esticando-se infinitamente.
- b) Apenas o tempo é afetado, acelerando para longe do buraco negro.
- c) Tanto o espaço quanto o tempo são dramaticamente curvados e distorcidos.
- d) Não há efeito no espaço-tempo, apenas um grande campo magnético.

Resposta correta: c) Tanto o espaço quanto o tempo são dramaticamente curvados e distorcidos.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta conecta a curvatura do espaço-tempo aos buracos negros. A discussão deve salientar a magnitude dessa distorção e como ela leva a fenômenos como a dilatação do tempo gravitacional e a impossibilidade de escape da luz.

8. Por que a luz se curva quando passa perto de uma estrela massiva, segundo a Relatividade Geral?

- a) A luz tem massa e é puxada pela gravidade da estrela.
- b) A luz colide com partículas na atmosfera da estrela.
- c) A estrela deforma o espaço-tempo ao seu redor, e a luz segue a curvatura desse espaço-tempo.
- d) A luz é atraída por campos magnéticos da estrela.

Resposta correta: c) A estrela deforma o espaço-tempo ao seu redor, e a luz segue a curvatura desse espaço-tempo.

Sugestão de discussão para o professor: Esta questão aborda um dos testes clássicos da Relatividade Geral (deflexão da luz). A discussão deve esclarecer que a luz, embora não tenha massa de repouso, é afetada pela curvatura do espaço-tempo. Isso contrasta com a gravidade newtoniana que só afetaria objetos com massa.

9. Qual seria um análogo físico simples para visualizar a ideia de que “massas curvam o espaço-tempo”?

- a) Uma balsa navegando em um rio calmo.
- b) Bolas de boliche em um lençol esticado.
- c) Um balão inflando.
- d) Uma corda vibrando entre dois pontos.

Resposta correta: b) Bolas de boliche em um lençol esticado.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta busca uma analogia comum e eficaz. A discussão deve explorar como a bola de boliche (massa) deforma o lençol (espaço-tempo) e como objetos menores (mármore) “rolam” nessa depressão, imitando órbitas. É importante ressaltar as limitações da analogia (é 2D para um espaço-tempo 4D).

10. Se você e um amigo estivessem flutuando no espaço, longe de qualquer objeto massivo, como a gravidade de Newton descreveria a interação entre vocês?

- a) Não haveria interação gravitacional porque vocês não estão em um planeta.
- b) Vocês se atrairiam com uma força gravitacional muito pequena, mas presente.
- c) Vocês se repeliriam devido a uma força desconhecida.
- d) Apenas um de vocês sentiria a gravidade do outro.

Resposta correta: b) Vocês se atrairiam com uma força gravitacional muito pequena, mas presente.

Sugestão de discussão para o professor: Esta questão reforça que a gravidade newtoniana age entre quaisquer massas. A discussão deve enfatizar que, embora a força seja minúscula e imperceptível no dia a dia sem massas planetárias, ela ainda existe e segue a mesma lei. Isso pode levar a uma transição para como a Relatividade Geral ainda prevê atração, mas através da curvatura.

Concept Questions para Aula 04

1. O Princípio da Equivalência, um dos postulados da Relatividade Geral de Einstein, afirma que a gravidade é indistinguível de qual outra condição?

- a) Aceleração constante.
- b) Velocidade constante.
- c) Ausência de massa.
- d) Força magnética.

Resposta correta: a) Aceleração constante.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta aborda o cerne do Princípio da Equivalência. A discussão deve focar na ideia de que um observador em um elevador acelerando para cima não consegue distinguir se está sob o efeito da gravidade ou de uma aceleração equivalente. Use exemplos como a sensação de peso em um elevador subindo.

2. Imagine-se dentro de uma caixa fechada no espaço. Se você sente seu corpo sendo “puxado” para o chão da caixa, o que, de acordo com o Princípio da Equivalência, pode estar acontecendo?

- a) Você está sendo puxado por um ímã gigante.
- b) A caixa está orbitando um planeta muito massivo.
- c) A caixa está acelerando constantemente, ou você está sob o efeito da gravidade.
- d) Você está em queda livre.

Resposta correta: c) A caixa está acelerando constantemente, ou você está sob o efeito da gravidade.

Sugestão de discussão para o professor: Esta questão reforça o Princípio da Equivalência de forma prática. A discussão deve levar os alunos a compreender que os efeitos da aceleração e da gravidade são localmente indistinguíveis, sem a necessidade de um referencial externo.

3. O Princípio da Covariância Geral da Relatividade Geral de Einstein afirma que as leis da física devem ser as mesmas para observadores em:?

- a) Apenas referenciais inerciais.
- b) Apenas referenciais acelerados.
- c) Qualquer referencial, independentemente de seu estado de movimento.
- d) Apenas referenciais em repouso.

Resposta correta: c) Qualquer referencial, independentemente de seu estado de movimento.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta introduz o segundo postulado fundamental. A discussão deve esclarecer que a Relatividade Especial lida apenas com referenciais inerciais, enquanto a Relatividade Geral estende essa ideia para incluir todos os tipos de movimento (acelerados, rotacionais, etc.), tornando as leis da física mais “gerais”.

4. O que significa dilatação do tempo em um campo gravitacional forte?

- a) O tempo acelera em regiões de alta gravidade.
- b) Os relógios batem mais rápido em regiões de alta gravidade.
- c) O tempo passa mais devagar em regiões de alta gravidade.
- d) O tempo para completamente em regiões de alta gravidade.

Resposta correta: c) O tempo passa mais devagar em regiões de alta gravidade.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta define o conceito de dilatação do tempo gravitacional. A discussão deve enfatizar que este é um efeito real e mensurável, não uma ilusão. Pode-se usar a analogia do tempo sendo “esticado” ou “retardado” pela gravidade.

5. Se você estivesse perto de um buraco negro e seu amigo estivesse em um planeta distante, quem observaria o tempo passar mais rapidamente para si mesmo?

- a) Você, perto do buraco negro.
- b) Seu amigo, no planeta distante.
- c) Ambos observariam o tempo passar na mesma velocidade.
- d) Ninguém, o tempo para em campos gravitacionais.

Resposta correta: b) Seu amigo, no planeta distante.

Sugestão de discussão para o professor: Esta é uma aplicação direta da dilatação do tempo. A discussão deve esclarecer que, do ponto de vista do amigo distante, seu relógio perto do buraco negro estaria batendo mais devagar. Peça aos alunos para justificarem com base no conceito de que o tempo desacelera em campos gravitacionais fortes.

6. Que tipo de objeto astronômico é o cenário ideal para observar os efeitos dramáticos da dilatação do tempo gravitacional?

- a) Um asteroide.
- b) Um planeta gigante como Júpiter.
- c) Uma estrela de nêutrons ou um buraco negro.
- d) Uma nebulosa de gás.

Resposta correta: c) Uma estrela de nêutrons ou um buraco negro.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta conecta a teoria a exemplos concretos. A discussão deve focar na necessidade de campos gravitacionais muito fortes para que os efeitos da dilatação do tempo sejam perceptíveis, como os encontrados em objetos compactos e extremamente densos.

7. O que aconteceria com um relógio se ele fosse colocado muito perto, mas ainda fora, do horizonte de eventos de um buraco negro, visto por um observador distante?

- a) Ele aceleraria e funcionaria mais rápido.
- b) Ele pararia de funcionar imediatamente.
- c) Ele pareceria funcionar muito, muito lentamente.
- d) Ele se desintegraria devido ao calor.

Resposta correta: c) Ele pareceria funcionar muito, muito lentamente.

Sugestão de discussão para o professor: Esta é uma variação da questão da dilatação do tempo, focando no limite extremo de um buraco negro. A discussão deve reiterar que o observador distante veria o relógio quase “congelado” no tempo à medida que se aproxima do horizonte de eventos.

8. Por que os sistemas de GPS (Global Positioning System) precisam levar em consideração os efeitos da Relatividade Geral (incluindo a dilatação do tempo)?

- a) Para corrigir a curvatura da Terra.
- b) Para compensar a diferença na passagem do tempo entre os satélites (em campo gravitacional mais fraco) e a superfície da Terra (em campo gravitacional mais forte).
- c) Para rastrear a velocidade dos carros no chão.
- d) Para medir a força do campo magnético da Terra.

Resposta correta: b) Para compensar a diferença na passagem do tempo entre os satélites (em campo gravitacional mais fraco) e a superfície da Terra (em campo gravitacional mais forte).

Sugestão de discussão para o professor: Esta questão conecta a Relatividade Geral a uma aplicação prática e cotidiana. A discussão deve explicar que, como os satélites estão mais altos (onde a gravidade é ligeiramente mais fraca), o tempo passa um pouco mais rápido para eles, e essa pequena diferença deve ser corrigida para que o GPS seja preciso.

9. Se as leis da física devem ser as mesmas em qualquer referencial (Princípio da Covariância Geral), isso significa que a força da gravidade é:?
- a) Diferente para cada observador.
 - b) Uma ilusão óptica.
 - c) Uma propriedade intrínseca do espaço-tempo, não uma força separada.
 - d) Constante em todo o universo.

Resposta correta: c) Uma propriedade intrínseca do espaço-tempo, não uma força separada.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta busca aprofundar a compreensão do Princípio da Covariância Geral e sua implicação sobre a natureza da gravidade. A discussão deve reforçar que, na Relatividade Geral, a gravidade não é uma força agindo a distância, mas sim uma manifestação da geometria do espaço-tempo.

10. Qual dos seguintes cenários não seria afetado pela dilatação do tempo gravitacional de forma perceptível para os seres humanos?

- a) Estar em órbita muito próxima de um buraco negro.
- b) Viver na superfície de uma estrela de nêutrons.
- c) Passar alguns dias no topo de uma montanha alta na Terra em comparação com o nível do mar.
- d) Viver na superfície da Terra em comparação com o espaço intergaláctico profundo.

Resposta correta: c) Passar alguns dias no topo de uma montanha alta na Terra em comparação com o nível do mar.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta avalia a escala dos efeitos da dilatação do tempo. A discussão deve esclarecer que, embora a dilatação do tempo gravitacional exista mesmo em campos fracos (como o da Terra), ela é insignificante para a experiência humana diária em altitudes diferentes, mas se torna dramática em objetos extremamente densos.

Concept Questions para Aula 05

1. Qual é a principal vantagem de usar um análogo de buraco negro (como o funil com areia) em vez de estudar um buraco negro real diretamente?

- a) Análogos permitem viagens seguras para dentro de buracos negros reais.
- b) Análogos são mais fáceis e seguros de construir e experimentar em um ambiente de sala de aula.
- c) Análogos podem prever com 100% de precisão todas as propriedades de um buraco negro.
- d) Análogos emitem a mesma quantidade de radiação que um buraco negro real.

Resposta correta: b) Análogos são mais fáceis e seguros de construir e experimentar em um ambiente de sala de aula.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta foca na utilidade dos análogos. A discussão deve enfatizar a acessibilidade e a segurança, além de reforçar que análogos são modelos simplificados e não representações perfeitas. Pode-se perguntar quais seriam as dificuldades de estudar um buraco negro real (distância, perigo, etc.).

2. No análogo de buraco negro do funil com areia, o que a curvatura da superfície da areia no funil representa?

- a) A massa da estrela que formou o buraco negro.
- b) A distorção do espaço-tempo causada por uma massa enorme.
- c) A temperatura do buraco negro.
- d) A velocidade de rotação do buraco negro.

Resposta correta: b) A distorção do espaço-tempo causada por uma massa enorme.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta avalia a compreensão da analogia principal. A discussão deve ligar diretamente a depressão criada pela areia à curvatura do espaço-tempo pela massa de um buraco negro real, reforçando a ideia da Relatividade Geral.

3. Qual característica um buraco negro real e o análogo do funil com areia compartilham em sua capacidade de “capturar” objetos?

- a) Ambos geram energia nuclear que atrai objetos.
- b) Ambos possuem uma região onde objetos, uma vez que a ultrapassam, não podem mais escapar.
- c) Ambos são capazes de emitir fortes rajadas de raios-X.
- d) Ambos têm uma superfície física sólida onde os objetos param.

Resposta correta: b) Ambos possuem uma região onde objetos, uma vez que a ultrapassam, não podem mais escapar.

Sugestão de discussão para o professor: Esta questão mira no conceito do horizonte de eventos e sua representação no análogo. A discussão deve esclarecer que a borda no funil onde as esferas caem é análoga ao horizonte de eventos do buraco negro real. É crucial enfatizar que o horizonte de eventos não é uma superfície física.

4. Em um buraco negro real, o que a luz faz quando atinge o horizonte de eventos?

- a) É refletida de volta para o espaço.
- b) É curvada e acelerada para fora do buraco negro.
- c) É aprisionada e não pode mais escapar.
- d) Passa através do buraco negro para outro universo.

Resposta correta: c) É aprisionada e não pode mais escapar.

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta reforça a definição mais fundamental do horizonte de eventos de um buraco negro real. A discussão deve reiterar a ideia de “ponto sem retorno” e por que os buracos negros são “negros” (a luz não escapa).

5. Se você soltasse uma pequena esfera no análogo do funil com areia e ela caísse no centro, o que isso representaria no contexto de um buraco negro real?

- a) A esfera se transformando em energia.
- b) Um objeto sendo ejetado para fora do buraco negro.
- c) Um objeto cruzando o horizonte de eventos e sendo puxado para a singularidade.
- d) A esfera orbitando o buraco negro de forma estável.

Resposta correta: c) Um objeto cruzando o horizonte de eventos e sendo puxado para a singularidade.

Sugestão de discussão para o professor: Esta questão conecta a observação do análogo ao evento real. A discussão deve explicar que o “centro” do funil é a analogia para a singularidade (ponto de densidade infinita) e que a queda da esfera representa a captura irreversível.

6. Qual destas é uma característica de um buraco negro real que não pode ser perfeitamente replicada pelo análogo do funil com areia?

- a) A capacidade de distorcer o espaço-tempo.
- b) A existência de um “horizonte de eventos”.
- c) A capacidade de afetar o tempo (dilatação do tempo gravitacional).
- d) A atração de objetos por gravidade.

Resposta correta: c) A capacidade de afetar o tempo (dilatação do tempo gravitacional).

Sugestão de discussão para o professor: Esta pergunta explora as limitações do análogo. A discussão deve salientar que, embora o funil mostre a curvatura espacial, ele não consegue replicar os efeitos temporais da Relatividade Geral de forma simples. Isso leva à compreensão de que modelos têm suas restrições.

7. O que a massa de um buraco negro real determina, entre outras coisas?

- a) Sua cor e temperatura.
- b) O tamanho de seu horizonte de eventos.
- c) A composição de seus elementos químicos.
- d) Se ele pode se mover no espaço.

Resposta correta: b) O tamanho de seu horizonte de eventos.

Sugestão de discussão para o professor: Esta questão relaciona a massa com uma característica observável (indiretamente) do buraco negro real. A discussão deve explicar que buracos negros mais massivos têm horizontes de eventos maiores, e que a massa é a principal propriedade que define um buraco negro (junto com spin e carga).

8. Ao observar o análogo do funil, se uma pequena esfera passa perto, mas não cai no centro, o que isso representa no contexto de um buraco negro real?

- a) A esfera foi ejetada para fora do universo.
- b) A esfera orbitou o buraco negro de forma estável ou escapou de sua atração.
- c) A esfera colidiu com uma parede invisível.
- d) A gravidade do "buraco negro" foi temporariamente desligada.

Resposta correta: b) A esfera orbitou o buraco negro de forma estável ou escapou de sua atração.

Sugestão de discussão para o professor: Esta questão aborda a possibilidade de órbita ou escape. A discussão deve mostrar que nem tudo que se aproxima de um buraco negro é automaticamente engolido; há regiões onde objetos podem orbitar de forma estável (esferas que giram sem cair no funil) ou simplesmente serem defletidos e continuar seu caminho.

9. Um buraco negro real é um objeto com densidade:?

- a) Baixa, como uma nuvem de gás.
- b) Média, como uma estrela normal.
- c) Extremamente alta, quase infinita em seu centro.
- d) Variável, dependendo do que ele consome.

Resposta correta: c) Extremamente alta, quase infinita em seu centro.

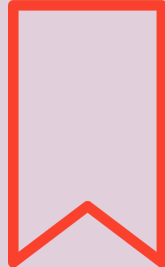
Sugestão de discussão para o professor: Esta questão aborda a densidade extrema dos buracos negros, introduzindo o conceito de singularidade. A discussão deve focar na compressão de uma massa enorme em um volume minúsculo, resultando em densidade inimaginável.

10. Qual é a principal diferença entre a parede interna do funil e o horizonte de eventos de um buraco negro real?

- a) A parede do funil é um objeto físico e visível, enquanto o horizonte de eventos é um limite teórico e invisível.
- b) A parede do funil é sólida, enquanto o horizonte de eventos é um gás.
- c) A parede do funil sempre reflete a luz, enquanto o horizonte de eventos sempre a emite.
- d) Não há diferença; são exatamente a mesma coisa.

Resposta correta: a) A parede do funil é um objeto físico e visível, enquanto o horizonte de eventos é um limite teórico e invisível.

Sugestão de discussão para o professor: Esta é uma questão de nuance importante para distinguir o modelo da realidade. A discussão deve reforçar que o análogo ajuda a visualizar o conceito, mas tem limitações físicas. O horizonte de eventos não é algo que se possa tocar ou ver no sentido tradicional.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Jamila Rodrigues de; SOLTAU, Samuel Bueno. Filme Interestelar e Sala de Aula Invertida: uma proposta para ensinar relatividade geral e buracos negros no Ensino Médio. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 11, n. 5, p. e40911528437, 2022.

AMAZONAS. Referencial Curricular Amazonense do Ensino Médio. Secretaria de Estado de Educação e Desporto, Comissão de Implementação da Base Nacional Comum Curricular no Amazonas, 2020.

BRASIL. Base Nacional Comum Curricular: Ensino Médio. Brasília: MEC/Secretaria de Educação Básica, 2017.

EINSTEIN, A. "The Foundation of the General Theory of Relativity". *Annalen der Physik*, 1916.

HAWKING, S. (1988). *A Brief History of Time*. Bantam Books.

MAZUR, E. (1997). *Peer Instruction: A User's Manual*. Prentice Hall.

MORAIS, Istenio Nunes de. Buracos negros: uma abordagem conceitual para professores do ensino médio. *Revista de Enseñanza de la Física*, [S. l.], v. 34, n. 2, p. 73-81, jul./dez. 2022.

SANTOS, Isabela Gomes dos et al. O Uso de Metodologias Ativas no ensino de Ciências: Um estudo de revisão sistemática. *Psicologia, Educação e Cultura*, Vol. XX IV, Nº 3. dezembro de 2020.

STUDART, Nelson. Inovando a Ensino de Física com Metodologias Ativas. *Revista do Professor de Física*, v. 3, n. 3, p. 1-24, Brasília, 2019. Instituto de Física - Universidade de Brasília.

