

Panorama das pesquisas sobre buraco negro nos periódicos do ensino de Física e Ciência

EDVATIO PHYSICORVM



ISSN 1870-9095

Patrynie Garcia Barbosa^{1,2}, Lisiane Barcellos Calheiro¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, UFMS, Campo Grande, MS, Brasil

²Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciência, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, Brasil

E-mail: patrynie@hotmail.com

(Recibido el 14 de octubre de 2022, aceptado el 29 de noviembre de 2022)

Resumo

O presente trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre a abordagem do tema buraco negro nos principais periódicos do Ensino de Física e Ensino de Ciência, nos últimos dez anos. A pesquisa resultou numa amostra de 33 artigos, os quais foram classificados em quatro grandes categorias: questões históricas, propostas didáticas testadas em sala de aula, levantamento de concepções e consulta bibliográfica. É possível constatar que o evidente aumento de publicações sobre buraco negro nos últimos cinco anos, com maior frequência em revistas internacionais que revistas brasileiras, se deve às recentes descobertas científicas sobre o objeto astronômico. No entanto, a maioria dos artigos ainda se refere à bibliografia de consulta para professores, o que nos leva a concluir que há um número baixo de estudos envolvendo propostas didáticas, especificamente propostas que investiguem os mecanismos envolvidos no processo de construção de conhecimentos relativo ao tema. A presente revisão na literatura sinaliza extenso campo de pesquisa ainda pouco explorado na área de ensino de Física e Ciência.

Palavras chave: Física Moderna e Contemporânea, buraco negro, revisão na literatura, ensino de Física.

Abstract

The present work presents a review of the literature on the approach of black holes in the main teaching of Physics and Science in the last ten years. The research resulted in a sample of 33 articles, which were classified into four major categories: didactic proposals tested in the classroom, survey of conceptions, theoretical essay and curriculum analysis. It is possible to verify that the evident increase in publications about black holes in the last five years, more frequently in international journals than in Brazilian journals, is due to recent scientific discoveries about the astronomical object. However, most of the articles still refer to the reference bibliography for teachers, which leads us to conclude that there is a low number of studies involving didactic proposals, specifically proposals that investigate the mechanisms involved in the process of building knowledge on the subject. The present literature review indicates an extensive field of research still little explored in the area of Physics teaching.

Keywords: Modern and Contemporary Physics, black hole, literature review, Physics teaching.

I. INTRODUCCIÓN

O desenvolvimento da Física Moderna e Contemporânea (FMC) acarretou novas maneiras de interpretar fenômenos. Como exemplo podemos citar a Teoria da Relatividade Geral (TRG), que auxiliou na compreensão do movimento dos corpos a partir do campo gravitacional. A TRG ampliou as possibilidades de entendermos os movimentos, tanto em altas velocidades quanto em baixas velocidades, sem refutar os preceitos da Física Clássica, proporcionando uma nova interpretação de tempo e espaço, além de propor a existência de Buracos Negros.

Nas últimas décadas, assuntos referentes à FMC têm sido amplamente divulgados nos meios de comunicação, em especial tratando sobre Buraco Negro, principalmente pelas recentes descobertas científicas como a que ocorreu em 2015, quando houve a primeira detecção de ondas gravitacionais pela *Laser Interferometer Gravitational-Waves Observatory*

(LIGO) geradas pela colisão de um sistema binário de Buracos Negros. Este estudo resultou no Nobel de Física, em 2017, aos cientistas Rainer Weiss, Barry C. Barish e Kip S. Thorne [1]. Em março de 2019, tivemos a captura da primeira imagem de um Buraco Negro pelos pesquisadores do *Event Horizon Telescope* (EHT) [2].

Também a inserção de tópicos de FMC na Educação Básica tem sido amplamente discutida na literatura, estando presente há décadas nas pesquisas da área de ensino de Física. Neste aspecto podemos destacar os trabalhos de Terrazzan [3] e Ostermann e Moreira [4], considerados precursores de propostas de inserção da FMC na Educação Básica no Brasil. Tais autores reforçam a necessidade de trabalhar os conhecimentos que estão presentes no contexto dos estudantes e que são importantes para o desenvolvimento da Ciência. De acordo com Calheiro [5], os conteúdos presentes em diferentes tópicos da FMC ainda não são uma realidade nas salas de aula. Para o autora, os professores ainda apresentam

dificuldades em ministrá-los, seja por sua complexidade ou pela falta de uma formação continuada específica, entre outros fatores.

Outra situação que dificulta a inserção de FMC nas escolas básicas é a difícil transposição dos conteúdos, passando pelo formalismo matemático utilizado nas explicações. Junior e Cruz [6] ressaltam que apesar dos licenciandos reconhecerem algumas dificuldades formativas frente aos tópicos de FMC, eles demonstram interesse em discutí-los na Educação Básica, ainda que alguns se sintam despreparados para tal tarefa.

Para Slovinski [7], a FMC precisa ser inserida no contexto escolar de modo responsável, a fim de que se estreite o distanciamento entre os conhecimentos da Física contemporânea e a necessidade de formação de um cidadão letrado em relação às questões que envolvem as demandas científico-tecnológicas atuais.

Em um estudo apresentado por Monteiro, Nardi e Filho (2009), apontou-se que, apesar de termos um aumento considerável no número de pesquisas relacionadas à introdução de tópicos de FMC no Ensino Médio, ainda há uma carência de trabalhos que vislumbrem métodos de abordagem e os possíveis tópicos que deveriam ser inseridos. Muito provavelmente as mesmas carências em relação ao ensino de FMC na educação básica também se fazem presente em relação ao Buraco Negro.

Há décadas reformas que tratam da estrutura curricular da área de Ciência da Natureza são uma realidade presente nos documentos oficiais que regem a Educação Básica, culminando com a promulgação da Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB) em 1996. Segundo Cavalcante (2013), a partir da LDB, as reformas ocorridas tiveram como objetivo iniciar o processo de mudança nos currículos e nas práticas dos professores. A LDB e os Parâmetros Curriculares Nacionais e suas orientações complementares procuraram apresentar uma aprendizagem com ênfase em habilidades e competências a partir de conceitos científicos contextualizados. Ao encontro dessas mudanças, a presença de tópicos de FMC nos documentos oficiais aparece como uma necessidade para entendermos os fenômenos ligados a situações vividas pelos estudantes.

Neste contexto, a perspectiva de reestruturação do currículo da disciplina de Física apresenta-se como uma realidade a partir da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para disciplina de Física e para a componente curricular Ciências no ensino fundamental. A BNCC é hoje o principal documento norteador da educação brasileira. Ela foi aprovada em 2018, e separa em unidades temáticas as componentes curriculares obrigatórias para todas as etapas da Educação Básica.

No que diz respeito aos conteúdos referentes à Física, Química e Biologia, os quais fazem parte da área da Ciência da Natureza e suas tecnologias, as alterações têm por objetivo ampliar e sistematizar as aprendizagens essenciais desenvolvidas até o nono ano do Ensino Fundamental em unidades temáticas Matéria e Energia, Vida e Evolução e Terra e Universo. Inseridas nestas temáticas pudemos encontrar diferentes tópicos de FMC expressos em forma de objetos de conhecimento a serem mobilizados com a finalidade de

possibilitar o desenvolvimento de competências e habilidades distribuídos em diferentes séries na Educação Básica.

No Ensino Médio, por sua vez, essas competências e habilidades privilegiam conhecimentos conceituais considerando-se a continuidade à proposta do Ensino Fundamental” e “propõe um aprofundamento nas temáticas Matéria e Energia, Vida e Evolução e Terra e Universo” (BRASIL, 2018, p.548). Como exemplo podemos citar a unidade temática Vida, Terra e Cosmos presente na competência específica 2. Nela podem ser mobilizados conhecimentos conceituais relacionados ao espectro eletromagnético, aos modelos atômicos, subatômicos e cosmológicos, à astronomia, à evolução estelar e gravitação entre outros. Já na competência específica 1, os fenômenos são analisados com base nas interações e relações entre matéria e energia e mobiliza conhecimentos conceituais relacionados à FMC, tais como a estrutura da matéria, o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias para obtenção de energia elétrica, a fusão e fissão nuclear entre outros [8].

Com vistas a contribuir para inserção de FMC no ensino básico, escolhemos o tema Buraco Negro como objeto de estudo, estando este inserido como objeto do conhecimento na unidade temática Vida, Terra e Cosmos, tópico que possibilita ao estudante desenvolver, compreender e analisar modelos científicos referentes à evolução, formação e morte de uma estrela, auxiliando no desenvolvimento de habilidades presentes na BNCC.

Mediante tais perspectivas, este estudo, procurou investigar o cenário das pesquisas sobre o tema Buraco Negro, o que nos conduziu às seguintes questões: Qual é o panorama das pesquisas sobre o Buraco Negro em periódicos nacionais e internacionais? Quais propostas didáticas estão sendo implementadas na Educação Básica? De que forma a produção científica da área de ensino de Ciências, fomentam a inserção do tópico de Buraco Negro na Educação Básica?

II. METODOLOGIA

Os artigos publicados nas revistas em ensino de Ciência e Física sobre buraco negro permitem compreendermos como este conteúdo está sendo trabalhado na educação básica. Para tanto, buscou-se, em literatura especializada, artigos em periódicos do ensino de Física e Ciência que abordassem sobre este corpo celeste, usando como metodologia a investigação de natureza qualitativa do tipo documental, segundo os passos sugeridos por Rosa [9]: (1) definição de palavras-chaves; (2) definição do escopo; (3) seleção do corpus; (4) análise. Esta pesquisa também abrangeu elementos de cunho quantitativo a fim de facilitar a elucidação dos dados.

A escolha dos periódicos objetivou contemplar artigos especializados em Ensino e/ou Educação em Ciências e/ou Física, classificados com Qualis A1, A2 e B1 de acordo com a avaliação da CAPES na área do Ensino; para isso utilizamos a classificação do quadriênio 2013-2016 e resultou em 17 periódicos nacionais, os quais estão listados no quadro I.

QUADRO I. Lista dos periódicos nacionais.

ISSN	Periódicos	Qualis
1982-5153	Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia	A2
1980-850X	Caderno Brasileiro de Ensino de Física	A1
1983-2117	Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências	A1
1518-8795	Investigação em Ensino de Ciências	A2
1806-5104	Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências	A2
0102-4744	Revista Brasileira de Ensino de Física	A1
1980-850X	Ciência & Educação	A1
2178-7727	Revista Acta Scientiae	A2
2317-5125	Amazônia - Revista de Educação em Ciências E Matemáticas	A2
1984-7505	Areté - Revista Amazônica de Ensino de Ciências	A2
2179-426X	Rencima - Revista de Ensino de Ciências e Matemática	A2
2238-2380	Revista de Educação, Ciências e Matemática	A2
1983-1730	Ensino Em Re-Vista	A2
1983-7011	Revista Eletrônica Ensino, Saúde e Ambiente	A2
2237-4450	Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista	B1

A fim de aumentarmos a abrangência de nossa pesquisa, também selecionamos periódicos internacionais em ensino de Física e ensino de Ciência, cuja avaliação no Qualis fosse A1, A2 e B1 na área do Ensino; também utilizamos a classificação do quadriênio 2013-2016, o que resultou nos 11 periódicos listados no quadro II.

QUADRO II. Lista dos periódicos internacionais.

ISSN	Periódicos	Qualis
2153-120X	American Journal of Physics	A2
2174-6486	Enseñanza de las Ciencias	A1
1464-5289	International Journal of Science Education	A2
0031-921X	The physics teacher	A2
0326-7091	Revista de Enseñanza de La Física	A2
1697-011X	Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias	A1
1132-9157	Enseñanza de las Ciencias de la Tierra	A1
2346-4712	Góndola, enseñanza y aprendizaje de las ciencias	A4
0305-7267	Studies in Science Education	A2
1870-9095	Latin - American Journal Of Physics Education	A2
0970-5953	Physics Education	A1

Para realizarmos a primeira etapa deste trabalho, com vistas a delimitarmos o universo da pesquisa, utilizamos o descritor (palavra-chave) “Buraco Negro”, em periódicos nacionais, para a seleção dos documentos que comporão o *corpus* da pesquisa; em relação aos periódicos internacionais, utilizamos as palavras “Agujeo Negro” e “Black Hole” como descritores para selecionarmos os artigos.

A etapa seguinte foi o delineamento do escopo da pesquisa. A busca de trabalhos nos periódicos compreendeu os artigos publicados no período de 2010 a 2021 onde os descritores apresentados estivessem contidos no título, palavras-chaves ou abstract do texto. Nesta etapa investigamos, nas edições das revistas, artigos que se enquadrassem nos critérios de busca pré-estabelecidos. Adotamos como critério de exclusão os trabalhos que não seguissem normas de organização em artigo, visto que nas revistas internacionais trabalhos como resumo de palestras ou ensaio teóricos são publicados junto de artigos. Este movimento resultou em 33 artigos.

Para análise dos resultados foram utilizadas, *a priori*, as categorias estabelecidas por Ortermann e Moreira [4]. Embora o trabalho seja um norteador para a presente revisão, nem todas as categorias propostas foram inseridas como objeto de análise, uma vez que o objetivo principal deste trabalho é apresentar o panorama dos artigos sobre buraco negro publicados em revistas do ensino de Ciência e Física. Deste modo a categoria *livros didáticos de nível médio que inserem temas de FMC* foi descartada de nossa análise, visto que não abrange as questões norteadoras desta pesquisa.

Na categoria *Questões epistemológicas e históricas referentes a buraco negro*, foram enquadrados os trabalhos em que a finalidade fosse a discussão sobre as rupturas de paradigmas e contextualização da teorização dos buracos negros, bem como recentes descobertas científicas. Na segunda categoria, *Concepções alternativas acerca de tópicos de buraco negro*, foram classificados os trabalhos que investigassem as concepções, para essa categoria não restringimos os sujeitos de pesquisa a alunos da educação básica. Por sua vez, na categoria *Temas de buraco negro apresentados como divulgação ou como bibliografia de consulta para professores*, foram categorizados os que apresentam resultados de pesquisa do campo de Astronomia ou Física sobre o tema, bem como explicações mais aprofundadas sobre métodos matemáticos para descrição dos fenômenos relacionados. Por último, em *Propostas testadas em sala de aula com apresentação de resultados de aprendizagem*, apesar de Ortermann e Moreira [4] delimitar esta categoria aos trabalhos com resultados de aprendizagem, foram inclusos os trabalhos que apresentavam apenas propostas experimentais.

Alguns dos trabalhos encontrados se enquadram em mais de uma categoria; optou-se, então, por situá-los naquela considerada mais próxima de seu propósito, lembrando que a classificação ora utilizada é apenas uma de muitas possíveis.

A análise dos artigos foi realizada em duas etapas. A primeira, descritiva, permitiu identificar a quantidade de artigos publicados por ano, o que permitiu que contrastássemos o montante de trabalhos sobre buraco negros em periódicos nacionais e internacionais.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A outra etapa, foi o processo de categorização dos trabalhos, a qual consistiu em uma análise interpretativa dos documentos selecionados.

A. Frequência das produções identificadas

A figura 1 apresenta a distribuição dos 33 trabalhos por ano, as barras apresentam o quantitativo de publicações em periódicos nacionais e internacionais. Por meio do gráfico, pode-se notar o crescimento da temática nos últimos 10 anos.

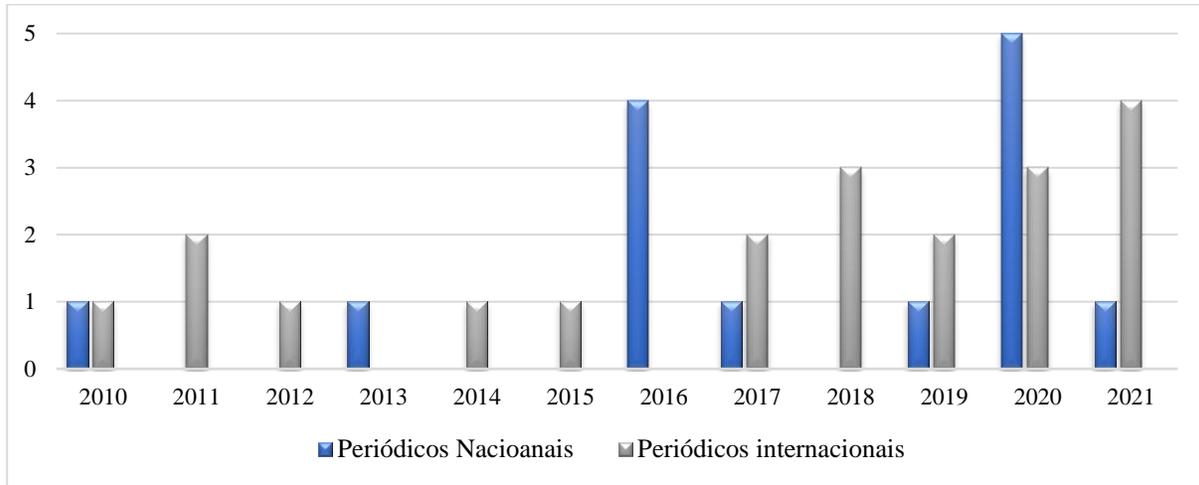


FIGURA 1. Publicações sobre buraco negro em revistas do ensino de Ciência e Física.

Podemos observar uma certa constância sobre a publicação acerca do tema em periódicos internacionais. Por outro lado, nas revistas brasileiras há um número reduzido de publicações; contudo, há um aumento significativo a partir do ano de 2020. Acreditamos que este comportamento se deve ao fato das recentes descobertas sobre buraco negro nos últimos anos, em especial com divulgação da primeira imagem no ano de 2019.

Ademais, ficou evidente a pequena quantidade de publicações em relação aos outros assuntos já bastante consolidados dentro da FMC, tais como efeito fotoelétrico, física de partículas, estrutura da matéria, entre outros [4]. Isto demonstra a incipiência do assunto no ensino de Ciência e Física.

B. Abordagem das produções por categorias

Considerando o levantamento literário apurado, utilizamos, como ponto de partida para categorização, o trabalho de revisão bibliográfica realizado por Ostermann e Moreira [4]. Tais autores catalogam as pesquisas sobre ensino de Física Moderna e Contemporânea no ensino médio em seis categorias. Destas, quatro serão utilizadas como referência neste trabalho, visto que nenhum artigo atendeu a categoria de *justificativa da inserção da temática buraco negro no ensino médio*. A seguir, apresentaremos os textos classificados em cada uma das quatro categorias selecionadas e uma discussão final sobre os mesmos.

C. Questões epistemológicas e históricas referentes a buraco negro

O trabalho de Steiner [10] apresenta uma abordagem histórica ao longo do século XX, sobre as conjecturas teóricas de buracos negros. O autor apresenta a solução de Schwarzschild para equação da relatividade geral que fornece a aceleração produzida por objetos em uma determinada distância. Porém, para um determinado raio, a equação apresentava uma singularidade que ficou conhecida como raio de Schwarzschild. Este resultado foi essencial para o desenvolvimento do conceito de buraco negro. Ao longo do texto o autor expõe especulações dos cientistas sobre a existência de objetos celestes que apresentassem uma densidade semelhante necessária para criar-se um buraco negro. Devido ao período de publicação, o autor encerra a discussão mostrando que a evidência mais concisa de buraco negro seria Sagittarius A*.

-Pontos fundamentais no trabalho de Saa [11] e Almeida [12] são as questões epistemológicas e sociais desse período. Na década de 30 havia uma rejeição, por parte da comunidade científica, do colapso gravitacional em estrelas com raio menor que raio de Schwarzschild, visto que desafiava as correntes filosóficas da época. O renascimento dos buracos negros surgiu no contexto da guerra fria, devido ao embate entre Estados Unidos e União Soviética. John Wheeler, representante da escola americana, foi o grande responsável por utilizar o termo “buraco negro” para a solução de Schwarzschild na literatura e pelos avanços teóricos sobre buraco negro. Na década de 60, com a descoberta de objetos

celestes de alta densidade (quasares e pulsares), as pesquisas sobre buraco negro tornaram-se bastante consolidadas. Assim, a existência de buracos negros foi finalmente aceita.

Machado e Tort [13] retratam o período anterior à relatividade geral, onde o conceito moderno de buraco negro - região do espaço-tempo da qual a luz não pode escapar - tem sua origem (século XVIII). No trabalho os autores apresentam os cálculos desenvolvidos por John Michell (1724–1793). Michell, a partir da mecânica newtoniana, propôs a existência de estrelas invisíveis para o observador – estrelas negras – pois, devido ao intenso campo gravitacional, nem a luz conseguiria escapar.

Por sua vez, Bassalo e Cattani [14] apresentam um breve histórico sobre as ondas gravitacionais. Relatam que na década de 60 foram constituídos grandes cilindros de alumínio a fim de detectá-las. No entanto, verificou-se que os detectores sólidos eram pouco eficientes. Assim, a partir de 1990, esses detectores deixaram de ser usados e começaram a ser substituídos pelos grandes interferômetros, como Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO). Em 2016, o primeiro sinal de ondas gravitacionais, denominado GW150914, foi confirmado, gerado pela coalescência de um sistema binário formado por dois buracos negros, vindo ao encontro dos estudos de Einstein sobre campos gravitacionais fracos, onde ele concluiu a existência de ondas gravitacionais a partir da equação da relatividade geral.

D. Concepções alternativas acerca de tópicos de buraco negro

O trabalho de Barbosa, Aquino e Calheiro [15] investiga as possíveis representações sociais de alunos da educação básica sobre Buraco Negro, a partir de mapas mentais com a mesma temática. Os resultados apontaram uma porcentagem maior de mapas mentais categorizados no universo reificado¹, no entanto esses denotavam uma relação superficial com o saber científico e pouco aprofundamento conceitual. Já em menor quantidade foram identificadas representações relacionadas ao senso comum, cujos mapas associavam “Buracos Negros” ao sentido prejudicial, como morte e destruição, categorizados pelas autoras no universo consensual².

Estes equívocos teóricos sobre buracos negros são apontados no trabalho de Riggs [16]. Os principais erros cometidos sobre assunto são: o interior de um buraco negro existe em um hiperespaço; um buraco negro vai “sugar” qualquer coisa passando por eles; os buracos negros acabarão por “engolir” tudo no universo; se um objeto passa por um horizonte de eventos do buraco, é observado “pairar” acima da localização do horizonte para um infinito Tempo; um buraco negro em rotação pode ser percorrido para outra região do nosso universo, ou para um universo diferente e/ou para

¹ Universo reificado (ou científico) – Se cristaliza no espaço científico, com seus cânones de linguagem e sua hierarquia interna. A sociedade é de especialistas onde há divisão de áreas de competência. Aqui é a Ciência que retrata a realidade independente de nossa consciência; estilo e estrutura fria e abstrata. (ARRUDA, 2002, p.130).

outro Tempo; a radiação eletromagnética é emitida por alguns buracos negros; a radiação Hawking é emanada de dentro de um buraco negro; o paradoxo da informação do buraco negro é sem importância ou foi resolvido. O autor supõe que estas concepções são influenciadas principalmente pelas representações imprecisas de buracos negros em histórias de ficção científica.

E. Temas de buraco negro apresentados como divulgação ou como bibliografia de consulta para professores

Apresentamos, a seguir, uma lista de temas que aparecem na literatura e suas correspondentes referências. De posse dos resultados, pode-se notar que há uma grande concentração de trabalhos que discutem as soluções para relatividade geral. Além disso, é nítido que temas de buraco negro como divulgação científica ou bibliografia de consulta são a maioria das publicações se comparado as outras três categorias apresentadas neste trabalho.

Os trabalhos categorizados em temas de divulgação ou como bibliografia de consulta para professores, abaixo listados, abrangem um vasto campo de temáticas sobre buraco negro, os quais foram classificados de acordo com o cerne principal da pesquisa e na sequência sintetizados:

- Solução de Schwarzschild: Szubka [17]; Santos et al. [18]; Muller, Weiskopf [19]; Muller, Boblest [20]; Muñoz [21]; Berrondo et al. [22]
- Solução de Ker: Lima Junior et al. (2021); Xavier [24]; Neves [25];
- Outras soluções: Ribeira, Cuadros-Melgar e Cardoso [26]; Neves [27]; Coimbra-araújo (2016)
- Relatividade: Pinochet (2020); Huggins (2018)
- LHC: Nóbrega e Mackedanz (2013); Roy (2011)
- Radiação Hawking: Pinochet (2015)
- Efeito doppler transversal: Santos, Magalhães (2020)
- Ondas Gravitacionais: Mathur, Brown e Lowenstein (2017)
- Horizonte de eventos: Tremaine (2021);

Szybka [17] apresentou em seu artigo a distância mínima na qual pode-se aproximar de um buraco negro em um voo livre. Ela corresponde a $r=4m$ da solução Schwarzschild para uma sonda que não era relativística no infinito. Deste modo, o autor pontua que por meio dos cálculos apresentados é possível o ensino da relatividade geral introdutória, à nível superior.

Já Santos et al. [18] apresentam um estudo teórico da energia de um fóton com o comprimento de onda da ordem do raio de Schwarzschild, bem como temperatura de um buraco

² Universo consensual – [...]. Aquele que se constitui principalmente na conversação informal, na vida cotidiana. As Representações Sociais constroem-se mais frequentemente na esfera consensual, embora as duas esferas não sejam totalmente estanques. As sociedades são representadas por grupos de iguais, todos podem falar com a mesma competência. A Representação Social é o senso comum, acessível a todos (ARRUDA, 2002, p.130).

negro; para isso utilizaram análise dimensional como escala de Planck³.

Muñoz [19] fornece a classificação das órbitas dos fótons em torno de um buraco negro de Schwarzschild com base nas funções elípticas Jacobianas. Esse método permite determinar a massa de um buraco negro a partir da deflexão angular e dados de dilatação do tempo.

Por sua vez, Muller e Weiskopf [20] desenvolveram um simulador computacional C++ que permite a visualização do céu estelar na vizinhança de um buraco negro de Schwarzschild para um observador que está estaticamente ao redor, a fim de compreender os efeitos da relatividade geral. Em relação ao trabalho de Muller e Boblest [21], estes também desenvolveram um simulador do céu estelar na vizinhança de um buraco negro, com a diferença de que o usuário pode alterar a velocidade do observador.

Berrondo et al. [22] expressa a solução de Schwarzschild como um tensor de Riemann. Os autores apresentaram os principais conceitos de álgebras geométricas; em particular, definimos a álgebra associada ao espaço tridimensional euclidiano, conhecida como álgebra de Pauli, de modo igual trataram do tensor de inércia para um corpo rígido. Apresentaram a aceleração da maré para o caso newtoniano e o tensor correspondente tem uma forma semelhante e discutiram o desenvolvimento paralelo, em termos de mapeamentos, entre bivectores para o caso do tensor de inércia primeiro e para o tensor conforme de Weyl.

Em relação aos artigos que apresentaram resultados de pesquisa a partir da solução de Keer, Lima Junior et al [23] analisam as sombras de buracos negros em rotação e a sua ligação com a primeira imagem de um buraco negro obtida pela colaboração internacional EHT. Os resultados mostraram a obtenção da sombra de Kerr a partir da forma das órbitas esféricas de fótons, bem como serviram para, valendo-se do método numérico denominado de *tracejamento inverso de raios*, gerar imagens que ilustram a percepção visual de um observador na presença de um buraco negro girante com e sem um disco de acreção.

Xavier [24] revisa as principais características do espaço-tempo de um buraco negro em rotação. A métrica utilizada para solução da equação da relatividade geral foi a de Keer, a qual apresenta uma região de não estática, denominada ergoregião, na qual é possível a existência de observadores parados em relação a referenciais estáticos no infinito. O autor, por meio da teoria de Hamilton-Jacobi, analisou as condições de existência das órbitas esféricas de fótons ao redor do buraco negro. Uma vez obtidas estas trajetórias, realizaram uma discussão sobre as equações que devem ser satisfeitas para que existam órbitas esféricas nesta geometria.

Pelo mesmo viés, Neves [25], em seu artigo, expressa as principais características dos buracos negros que usam a geometria de Keer. O principal fenômeno abordado é a sombra produzida pelo buraco negro; isto se deve à obstrução

de uma região do céu estrelado devido ao horizonte de eventos. O autor também discute a geometria ou buraco negro girante de Kerr, mostrando as equações das geodésicas para esse espaço-tempo e o procedimento para construção de sombras. Por fim, o autor salienta a importância do estudo sobre o fenômeno de sombra para campos de pesquisa, de modo que elenca alguns trabalhos que utilizaram dados do M17*

Em uma análise divergente, Ribeira, Cuadros-Melgar e Cardoso [26] apresenta outras soluções para buraco negro. A título de ilustração, mostra a solução de Reissner-Nordström, a qual descreve esse corpo celeste com massa e carga elétrica, bem como a solução Bañados-Teitelboim-Zanelli (BTZ), que descreve um buraco negro com massa e momento angular em um espaço-tempo tridimensional com constante cosmológica negativa. Ambas soluções partiram do método de Kerr-Schild que utiliza a base a métrica de Minkowski.

Ao contrário do que se pode pensar, um buraco negro não precisa necessariamente conter uma singularidade. O artigo de Neves [27] mostra uma das consequências dos trabalhos de Andrei Sakharov e seus colaboradores, que foi construir matematicamente buracos negros sem uma singularidade. Os resultados da Sakharov mostravam a possibilidade de evitar o problema das singularidades, mesmo no contexto da relatividade geral, por meio de um tipo de espaço-tempo: o espaço-tempo do tipo de Sitter. Assim, com tal espaço-tempo no interior de um buraco negro, seria possível evitar o aparecimento de uma singularidade no interior de um objeto astrofísico.

Nessa mesma perspectiva de se evitar a singularidade, o trabalho de Coimbra-Araújo [28] apresenta método para lidar com a singularidade de uma certa métrica específica – coordenadas do diagrama de Penrose –, muito utilizada na literatura. Os autores mostram que tal singularidade não é um parâmetro real, mas uma singularidade de coordenada, a qual pode ser evitada por meio da chamada coordenada do tipo *tortoise*. De mesma forma, os autores apresentam outras transformações utilizadas como forma de remover singularidades de horizontes da origem, denominadas *coordenadas de Kruskal-Szekeres*. Por fim, expõem um meio simplificado de deduzir um diagrama de Penrose a partir de uma dada métrica, exemplificando seu uso para solução de Kerr-Newman e Reissner-Nordstrom, destacando sua importância como artifício matemático.

Dos artigos que tiveram como cerne das discussões a Relatividade Geral, destacamos as contribuições de Pinochet [29], visto que seu trabalho apresenta de forma não técnica os testes clássicos teorizados por Einstein. O autor oferece explicações à nível introdutório sobre a relatividade geral com auxílio de uma matemática simples. Ao longo do texto, apresenta uma explicação qualitativa do conceito de curvatura do espaço-tempo e discute sua relação com o princípio de equivalência. Apesar do nosso objeto de estudo não ser o

3 Existem três constantes fundamentais presentes nas teorias de FM que representam os pilares básicos do universo. São eles, os fenômenos quânticos (h- constante de Planck), relativísticos (c- velocidade da luz) e gravitacionais (G- constante gravitacional). Essa forma de representar as unidades ficou conhecida como escala de

Planck e os significados e interpretações físicas destes valores têm sido buscados desde então.

objetivo central do trabalho, destacamos a importância deste como material educacional e de consulta para professores, uma vez que a teorização dos buracos negros parte da relatividade geral.

Em leitura análoga, Huggins [30] contrata a teoria newtoniana da relatividade geral para explicar a gravitação. O autor ressalta que o comportamento de queda livre dos corpos é causado por uma curvatura do espaço-tempo, em vez de uma força newtoniana instantânea, o que representa não apenas curvatura do espaço-tempo, mas também probabilidade dessa dimensão ondular, na forma de uma onda gravitacional. Exemplifica essa possibilidade com a onda gravitacional detectada em 14 de setembro de 2015, pelo LIGO, causada pelo choque de um sistema binário de buracos negros.

Nóbrega e Mackedanz [31] apresentam detalhes sobre o funcionamento *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*- CERN- sobre os quatro detectores principais do complexo. Posto isso, os autores demonstram os cálculos relacionados à energia concentrada nestas colisões de partículas, de modo a desmitificar que a formação de buracos negros, nos experimentos desenvolvidos no CERN, poderia causar a destruição da Terra.

Ainda sobre os estudos desenvolvidos no LHC, Roy [32] discute sobre as possibilidades de análise de miniburacos negros. Esse estudo é possível, pois a colisão de prótons produz uma pequena região de intenso campo gravitacional, de modo que formem miniburacos negros. O autor salienta que, na fase de evaporação de um buraco negro, os efeitos da gravidade quântica tornam-se importantes e devido à falta de conhecimento adequado desta fase. Os modelos de simulação atuais mostram que buraco negro ou explode em um certo número de partículas ou deixa um remanescente. Outra possibilidade das pesquisas desenvolvidas no LHC é a *supersymmetry* (SUSY). Esse modelo prevê que cada partícula do modelo padrão tem um *superpartner* correspondente; no entanto, as partículas SUSY não são observadas na natureza, visto que são mais pesadas do que seus parceiros do modelo padrão. Os aceleradores de partículas antes do LHC não operavam com a energia e intensidade necessárias para produzir partículas SUSY. Desse modo, os sinais SUSY podem imitar os sinais buraco negro no LHC. Nesse contexto, o autor sugere aos pesquisadores do LHC distinguir os sinais de buracos negros e partículas SUSY.

Pinchet [33] elucida as contribuições de Stephen Hawking sobre a fase de evaporação de buraco negro. Esse importante físico teórico descobriu que os buracos negros possuem temperatura característica, consequentemente são capazes de emitir radiação. Uma vez que todo o volume do espaço está sujeito a flutuações quânticas, o processo também deve ocorrer na região localizada apenas fora do horizonte. No entanto, por causa do intenso campo gravitacional presente naquela região, as forças das marés são tão poderosas que podem separar definitivamente uma partícula de sua antipartícula. Dessa forma, o buraco negro é capaz de absorver uma das partículas, enquanto a outra pode escapar e se afastar do horizonte de eventos à distância arbitrariamente longa.

Por meio dos resultados obtidos, pode-se demonstrar que a radiação Hawking é térmica e que tem associado a ela um espectro de comprimentos de onda cuja distribuição

corresponde a um corpo negro. Portanto, para um observador externo, o horizonte de eventos não apenas emite Radiação Hawking, mas também tem uma temperatura característica - temperatura Hawking- que aparece como uma fonte térmica associada ao próprio buraco negro. De fato, para evitar violações do princípio de conservação da energia de massa, a radiação Hawking deve ser acompanhada por uma redução correspondente à massa-energia do buraco negro. Esta redução implica que as partículas absorvidas devem ter uma massa-energia negativa, enquanto as partículas emitidas devem ter massa-energia positiva. Este processo envolve uma massa-energia em contínua redução que leva à evaporação do buraco negro em um tempo característico chamado tempo de evaporação. No entanto, não é possível notáveis evidências astronômicas para a existência de miniburacos.

Santos e Magalhães [34] apresentam estudo sobre o efeito doppler transversal, com base nos dados da luz emitida por uma das estrelas que orbitam próximas ao buraco negro massivo Sgr A*, no centro da galáxia Via Láctea.

Em relação ao estudo das ondas gravitacionais, Mathur, Brown e Lowenstein [35] destacam a importância dos dados obtidos pelo LIGO, que em setembro de 2015 detectou a radiação gravitacional da fusão de um sistema binário de buracos negros. Os autores, ao contrário dos trabalhos apresentados que partem da relatividade geral, partem da mecânica newtoniana para estimar a energia liberada na fusão de buraco negro, a partir dos resultados teóricos os comparam com os dados divulgados pelo LIGO, em 2016, GW150914. Este tratamento apenas fornece uma compreensão da ordem de magnitude do evento.

Tremaine, Kocsis e Loeb [36] apresentam em seu trabalho sobre o equilíbrio e as flutuações de um gás ideal em um recipiente rígido. Os autores examinaram o caso menos conhecido quando a caixa está flutuando livremente; em particular, determinamos as flutuações da caixa em velocidade e posição devido às interações com o gás que ela contém. Este sistema é um modelo de brinquedo para as flutuações de velocidade e posição de um buraco negro cercado por estrelas no centro de uma galáxia. Essas flutuações podem ser observadas em galáxias próximas.

F. Propostas testadas em sala de aula com apresentação de resultados de aprendizagem

Os trabalhos classificados nessa categoria apresentam sugestões de práticas experimentais para as aulas de Física, relacionando-as às implicações da Relatividade ao tempo. No entanto, apenas um artigo apresentou resultados de aprendizagem da aplicação implementada em sala de aula. Isso corrobora a importância e necessidade de mais pesquisas sobre tema, em especial na área de ensino.

Lam [37] apresenta uma demonstração usando dois metrônimos e um microfone que serve como um análogo acústico de um detector de ondas gravitacionais à escala galáctica, ou seja, uma matriz de temporização de pulsar; explica que a atividade experimental seria uma versão adaptada desta demonstração que pode ser usada como uma investigação laboratorial instrucional no nível de graduação. O autor afirma que a demonstração é mais adequada para

alunos de graduação ou do ensino médio que já têm alguma familiaridade com física básica e astronomia. No entanto, não são apresentados maiores detalhes sobre o ambiente e os sujeitos envolvidos na demonstração nem explicações mais profundas sobre afirmação.

Neste mesmo viés, Patterson [38] também apresenta uma atividade experimental usando dois metrônimos e um microfone que serve como um análogo acústico de um detector de ondas gravitacionais à escala galáctica, ou seja, uma matriz de temporização de pulsar. O autor utilizou dois relógios atômicos a fim de comparar o tique-taque do tempo no Colorado College, com elevação 1.845 m acima do nível do mar, com a Academia da Força Aérea dos Estados Unidos, cuja elevação 2.165 m, e próximo ao cume do Pikes Peak, de elevação 4.288 m. Mediante o experimento, foi comprovado que relógio em altitudes mais elevadas o tempo passou mais rapidamente. O autor pontua que, apesar da dilatação do tempo terrestre ser pequeno, pode ser significativo para certas aplicações, como as implicações para satélites em operação. Este trabalho foi realizado com a colaboração de formandos e professores de Física do Colorado College e da Academia da Força Aérea dos Estados Unidos (USAF). O experimento também foi discutido na USAFA em um curso introdutório à física envolvendo algumas centenas de cadetes. Burko [39] apresenta o projeto Pulsar Search Collaboratory, que envolve alunos e professores da escola na análise de dados reais do telescópio Robert C. Byrd Green Bank com o propósito de descobrir estrelas exóticas chamadas pulsares. Esses relógios cósmicos podem ser usados como detectores de ondas gravitacionais, em escala galáctica, que são ondulações no espaço-tempo que foram recentemente detectadas diretamente a partir da fusão de buracos negros de massa estelar. Os alunos do Pulsar Search Collaboratory (PSC) descobriram sete pulsares desde o início do curso em 2008. Originalmente direcionado a professores e alunos na Virgínia Ocidental, com o tempo o programa cresceu e atingiu 18 estados. Em um novo esforço para dimensionar o PSC nacionalmente, foi desenvolvido um programa de treinamento online integrado com palestras autoguiadas e tarefas de casa e interações em tempo real com astrônomos pulsares. Agora, qualquer estudante do ensino médio pode juntar-se à excitante busca por pulsares e à descoberta de um novo tipo de ondas gravitacionais. Barbosa e Calheiro [40] apresentaram resultados de aprendizagem dos possíveis invariantes operacionais⁴ sobre buraco negro por meio de uma situação-problema introdutória implementada em sala de aula, com o auxílio de um organizador avançado, qual seja, um vídeo como o episódio “Threehouse of horror XXIII”. Os resultados mostram que grande parte dos estudantes não apresentavam conhecimentos prévios relevantes que servissem de ligação sobre buraco negro, o que dificultou a explicitação de invariantes operatórios adequados para situação-problema apresentada. Por fim, os autores concluem que o vídeo utilizado não cumpriu sua função de organizador avançado,

⁴ Vergnaud [41] salienta que invariantes operatórios são uma importante componente cognitiva dos esquemas, uma vez que permitem a “identificação de objetos materiais e de suas relações

visto que uma grande parte dos alunos o utilizou para responder à situação-problema.

IV. CONCLUSIONES

Como conclusão deste artigo de revisão da literatura, entendemos como relevante ressaltar que a maior concentração de publicações aparece na categoria *Temas de buraco negro apresentados como divulgação ou como bibliografia de consulta para professores*, em contraposição com as *concepções alternativas sobre buracos negros e propostas testadas em sala de aula*. Esta dicotomia evidencia uma necessidade de amadurecimento da linha de pesquisa sobre “buraco negro no ensino médio”.

Deste modo, salicenta-se que devido à contemporaneidade do assunto, buraco negro ainda se coloca como um desafio cognitivo cujos conhecimentos os pesquisadores buscam transpor a nível de formação de professores. Ou seja, colocar todas estas reflexões na prática da sala de aula é ainda um desafio para pesquisadores da área de ensino.

Por fim, podemos afirmar que o tema é muito incipiente no ensino de Física e Ciência; no entanto, a importância para estas áreas se deve a sua atualidade, pois o conhecimento acerca do objeto astronômico em referência está relacionado com os conhecimentos científicos que vêm sendo amplamente produzidos pela área das ciências brutas, merecendo maiores investigações por parte dos pesquisadores na área do ensino.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

REFERÊNCIAS

- [1] Bassalo, J. M. F., & Cattani, M. *Detecção de ondas gravitacionais*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física **33**, 879-895 (2016).
- [2] Almeida, C. R. *A pré-história dos buracos negros*. Revista Brasileira de Ensino de Física **42**, 1- 16. (2020).
- [3] Terrazzan, E. A. *A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física **9**, 209-214 (1992).
- [4] Ostermann, F., & Moreira, M. A. *Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa: Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio*. Investigações em ensino de ciências, Porto Alegre **5**, 23-48. (2000).

pela percepção e interpretação das informações em situações que envolvem a incerteza, hipóteses, e raciocínios que repousam sobre os objetos sofisticadamente elaborados pela cultura”. (VERGNAUD, 2009, p. 23).

- [5] Calheiro, L. B. *Inserção de tópicos de física partículas de forma integrada aos conteúdos tradicionalmente abordados no ensino médio*. (2014).
- [6] Junior, R. M. F., Cruz, S. F., *Física moderna e contemporânea na formação de licenciandos em física: necessidades, conflitos e perspectivas*, Ciência & Educação **15**, p. 305-321, 2009.
- [7] Slovinski, L., *A física moderna e contemporânea nas obras indicadas pelo programa nacional do livro didático: uma análise sob a perspectiva da transposição didática*, 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense, Niterói **59**, (2012).
- [8] Brasil. Base Nacional Comum Curricular: Ensino Médio. Brasília: MEC/Secretaria de Educação Básica, (2018).
- [9] ROSA, P. D. S., *Uma introdução à pesquisa qualitativa em ensino*, (Editora da UFMS, 1da. Edición, Campo Grande, 2015).
- [10] STEINER, João E., *Buracos Negros: sementes ou cemitérios de galáxias?* Caderno Brasileiro de Ensino de Física **27**, 723-742 (2010).
- [11] Saa, A., *Cem anos de buracos negros: o centenário da solução de Schwarzschild*. Revista Brasileira de Ensino de Física **38**, 1-20 (2016).
- [12] Almeida, C. R., *A pré-história dos buracos negros*, Revista Brasileira de Ensino de Física **42** (2020)
- [13] Machado, R. R., & Tort, A. C., *Michell, Laplace e as estrelas negras: uma abordagem para professores do Ensino Médio*. Revista Brasileira de Ensino de Física **38** (2016)
- [14] Bassalo, J. M. F., & Cattani, M., *Detecção de ondas gravitacionais*, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **33**, 879-895 (2016)
- [15] Barbosa, P. G., Aquino, A. M., & Calheiro, L. B., *Representações sociais de alunos da educação básica sobre buracos negros*, Revista de Enseñanza de la Física **32**, 135-142 (2020).
- [16] Riggs, P. J., *Black holes: basic concepts and popular misconceptions*, Physics Education **54**, (2019).
- [17] Szybka, S. J., *Black hole flyby*, American Journal of Physics **89**, 783-788 (2021).
- [18] Santos, C. M. F. D., Silva, J. M. C. D., Gomes, É. C., & Lobo, M. P., *Uma proposta didático-matemática para o uso da escala de Planck: dos fótons aos buracos negros*, Revista Brasileira de Ensino de Física **42** (2020).
- [19] Muñoz, G., *Orbits of massless particles in the Schwarzschild metric: Exact solutions*, American Journal of Physics **82**, 564-573 (2014).
- [20] Müller, T, Weiskopf, D., *Distortion of the stellar sky by a Schwarzschild black hole*, American Journal of Physics **78**, 204-214 (2010).
- [21] Müller, T, Boblest, S., *Visualizing circular motion around a Schwarzschild black hole*, American Journal of Physics **79**, 63-73 (2011).
- [22] Berrondo, M., Greenwald, J. Verhaaren, C., *Unifying the inertia and Riemann curvature tensors through geometric algebra*, American Journal of Physics **80**, 905-912 (2012).
- [23] Lima Junior, H. C., da Cunha, P. V., Herdeiro, C. A., Crispino, L. C., *Black holes shadows: unveiling the physics behind the image of M87*, Revista Brasileira de Ensino de Física **43**, (2020)
- [24] Xavier, S. V., Leite, L., Benone, C. L., Herdeiro, C. A., & Crispino, L. C., *Órbitas esféricas de fótons ao redor de um buraco negro de Kerr*, Revista Brasileira de Ensino de Física **42** (2020).
- [25] Neves, J., *O buraco negro e sua sombra*, Revista Brasileira de Ensino de Física **42**, (2020).
- [26] Ribeiro, E. V., Cuadros-Melgar, B., & Cardoso, F. R., *Geração de soluções exatas em Relatividade Geral através do Método de Kerr-Schild*, Revista Brasileira de Ensino de Física **41**, (2019).
- [27] Neves, J., *Relatividade bem comportada: buracos negros regulares*, Revista Brasileira de Ensino de Física **39**, (2017)
- [28] Coimbra-Araújo, C. H., *Diagramas de Carter-Penrose em Relatividade Geral: buracos negros e outros exemplos explícitos*. Revista Brasileira de Ensino de Física **38**, (2016).
- [29] Pinochet, J., *Classical tests of general relativity I: looking to the past to understand the present*, Physics Education **55**, (2020)
- [30] Huggins, E., *Curved spacetime (gravity) tells mass (energy) how to move*. The Physics Teacher **56**, 591-595 (2018)
- [31] Nóbrega, F. K., Mackedanz, L. F. *O LHC (Large Hadron Collider) e a nossa física de cada dia*. Revista Brasileira de Ensino de Física **35**, 1-11 (2013).
- [32] Roy, A. *Black Holes and the Large Hadron Collider*. The Physics Teacher **49**, 544-545 (2011).
- [33] Pinochet, J., *Hawking temperature: an elementary approach based on Newtonian mechanics and quantum theory*, Physics Education **51**, (2015).
- [34] Santos, W. C., Magalhães, R. S., *Efeito Doppler gravitacional na órbita da estrela S2 em torno do buraco negro massivo Sgr A* no centro da Via Láctea*, Revista Brasileira de Ensino de Física **42**, (2020).
- [35] Mathur, H., Brown, K., Lowenstein, A. *An analysis of the LIGO discovery based on introductory physics*, American Journal of Physics **85**, 676-682 (2017).
- [36] Tremaine, S., Kocsis, B., Loeb, A. *Thermal equilibrium of an ideal gas in a free-floating box*, American Journal of Physics **89**, 789-792 (2021).
- [37] Lam, M. T., Romano, J. D., Key, J. S., Normandin, M., & Hazboun, J. S., *An acoustical analogue of a galactic-scale gravitational-wave detector*, American Journal of Physics **86**, 755-764 (2018).
- [38] Patterson, B., Serna, M., Gearba, M. A., Olesen, R., O'Shea, P., Schiller, J., Steele, J., *An undergraduate demonstration of gravitational time dilation*, The Physics Teacher **58**, 268-270 (2020)
- [39] Burko, L. M., *Gravitational wave detection in the introductory lab*, The Physics Teacher **55**, 288-292 (2017).
- [40] Barbosa, P. G., Calheiro, L. B., *Mobilização e explicitação de invariantes operatórios sobre buraco negro*, Revista de Enseñanza de la Física **33**, 309-316 (2021).
- [41] Vergnaud, G., *A aprendizagem matemática na perspectiva da Teoria dos Campos Conceituais*, (Editora CVR, 1da. Edición, Curitiba, 2009).