

Um panorama sobre a conceitualização da relação massa-energia em artigos publicados em periódicos científicos

An overview of the conceptualization of the mass-energy relationship in articles published in scientific journals

Una visión general de la conceptualización de la relación masa-energía en artículos publicados en revistas científicas

Joyce Luzia Chaves Dutra (joyce.dutra@ufms.br)

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, Brasil, **ORCID: 0000-0001-8491-8246**

Wellington Pereira de Queirós (wellington_fis@yahoo.com.br)

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, Brasil, **ORCID: 0000-0002-9734-7136**

Clair de Luma Capiberibe Nunes¹ (clairdeluma@gmail.com)

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, Brasil, **ORCID: 0000-0002-6536-3131**

Resumo:

Este ensaio é uma apresentação sintética de uma pesquisa que propôs responder a seguinte pergunta “: *como a relação massa-energia está sendo conceitualizada nos artigos publicados em periódicos científicos?*” A partir de uma coleta de dados nas plataformas *Scielo, Redalyc, Eric e Google Acadêmico*, foram encontrados 30 artigos científicos que discutem a relação massa-energia ($E = mc^2$). A nossa análise revelou que 70% destes artigos apresentam algum erro conceitual a respeito da relação massa-energia. Esses dados são preocupantes, pois indicam que conceitos inadequados poderão ser utilizados nos processos de ensino-aprendizagem de física e que esses periódicos, apesar dos processos de revisão pelos pares, estão validando resultados incongruentes. Desta forma, esperamos com esse ensaio, conscientizar educadores em ciência, pesquisadores, editores, pareceristas e educandos sobre os principais equívocos envolvendo a relação massa-energia.

Palavras-chave: Relatividade Especial; Relação Massa-Energia; Ensino de Ciências.

Abstract:

¹ Nome civil: Ricardo Capiberibe Nunes, a autora é travesti.

Recebido em: 20/01/2023

Aceito em: 20/03/2023

This essay is a synthetic presentation of a research that proposed to answer the following question: “*How is the mass-energy relationship being conceptualized in articles published in scientific journals?*” From a data collection on the *Scielo*, *Redalyc*, *Eric* and *Google Scholar* platforms, 30 scientific articles were found that discuss the mass-energy relationship ($E = mc^2$). Our analysis revealed that 70% of these articles present some conceptual error regarding the mass-energy relationship. These data are worrying, as they indicate that inappropriate concepts may be used in the teaching-learning processes of physics and that these journals, despite peer review processes, are validating incongruent results. Thus, we hope with this essay to make science educators, researchers, editors, reviewers, and students aware of the main misconceptions involving the mass-energy relationship.

Keywords: Special Relativity; Mass-Energy Relationship; Science Teaching.

Resumen:

Este ensayo es una presentación sintética de una investigación que se propuso responder a la siguiente pregunta: “*¿Cómo se conceptualiza la relación masa-energía en artículos publicados en revistas científicas?*” A partir de una recopilación de datos en las plataformas *Scielo*, *Redalyc*, *Eric* y *Google Scholar*, se encontraron 30 artículos científicos que discuten la relación masa-energía ($E = mc^2$). Nuestro análisis reveló que el 70% de estos artículos presentan algún error conceptual con respecto a la relación masa-energía. Estos datos son preocupantes, pues indican que se pueden utilizar conceptos inapropiados en los procesos de enseñanza-aprendizaje de la física y que estas revistas, a pesar de los procesos de revisión por pares, están validando resultados incongruentes. De esta manera, esperamos con este ensayo concienciar a los educadores, investigadores, editores, revisores y estudiantes de ciencias sobre los principales conceptos erróneos que involucran la relación masa-energía.

Palabras-clave: Relatividad Especial; Relación Masa-Energía; Enseñanza de las Ciencias.

INTRODUÇÃO

A relação massa-energia, $E = mc^2$, é um dos marcos da memória científica e tornou-se um símbolo da Física Moderna, em especial da Teoria da Relatividade Especial (TRE). Malgrado a enorme difusão dessa relação, ela ainda é mal compreendida (WARREN, 1976; MARTINS, 1998b, 2012; OSTERMANN; RICCI, 2004; NUNES, QUEIRÓS, 2020; NUNES, QUEIRÓS, CUNHA, 2022). De um lado, há aqueles que ignoram que o desenvolvimento dessa relação foi consequência do trabalho de pesquisa de inúmeros cientistas do século XIX e início do século XX (IVES, 1952; WHITTAKER, 1953;

FADNER, 1988; MARTINS, 1989, 1998a, 2005a, 2015; NUNES, QUEIRÓS, 2020; NUNES, QUEIRÓS, CUNHA, 2022) e atribuem o mérito exclusivamente ao físico alemão-suíço-estadunidense, Albert Einstein. De outro, Warren (1976), Martins (1998, 2012), Nunes e Queirós (2020), Nunes Queirós e Cunha (2022) denunciam interpretações conceitualmente inadequadas acerca do significado dessa equação, como aquelas proposições que alegam que esta relação estabeleceria um processo de interconversão entre massa e energia ou uma equivalência entre massa-energia.

Tendo em vista a importância da inserção de tópicos de Física Moderna no Ensino Médio (cf. SILVA, CARVALHO, PHILIPPSSEN, 2022) e os problemas evidenciados por Warren (1976), Martins (1998, 2012), Nunes e Queirós (2020), Nunes, Queirós e Cunha (2022), surgiu o problema que orientou essa pesquisa: “*como a relação massa-energia está sendo conceitualizada nos artigos publicados em periódicos científicos?*” Para responder essa pergunta, empreendemos uma investigação teórica em três momentos que objetivou apresentar uma análise conceitual da relação massa-energia em artigos científicos publicados em periódicos científicos.

No primeiro momento, construímos uma síntese histórica e conceitual da relação massa-energia a partir dos trabalhos de, Ives (1952), Whittaker (1953), Warren (1976), Stachel e Torretti (1982), Fadner, (1988), Martins (1989, 1998a, 2005a, 2012, 2015), Nunes e Queirós (2020), Nunes Queirós e Cunha (2022). Posteriormente, essa síntese foi resumida para compor a Fundamentação Teórica. No segundo momento, realizamos uma coleta de artigos que discutem a relação massa-energia em periódicos científicos, cujos detalhes serão apresentados oportunamente na Metodologia. No terceiro momento, os artigos selecionados foram confrontados com a síntese, desenvolvida no primeiro momento, e categorizados como “*Adequados*” e “*Inadequados*”. Dentro da categoria “*Inadequados*” desenvolvemos uma tipologia dos erros encontrados.

A nossa análise evidenciou que 70% dos artigos que compõem o *corpus* da pesquisa apresentam algum tipo de incongruência acerca da relação massa-energia. Consideramos esse resultado alarmante, pois, esses artigos foram avaliados pelos pares e, alguns destes, foram publicados em revistas indexadas na área de ensino e, portanto, essas imprecisões

ganham validação e tendem a se converter em obstáculos para o ensino de ciências, em particular o ensino de física. Estes dados compõem a seção de Resultados e Discussões.

Desta forma, esperamos conscientizar os educadores e os pesquisadores em educação em ciências sobre os erros conceituais mais comuns envolvendo a relação massa-energia e como evitá-los durante o ensino de Física Moderna, “(...) pois um erro, depois de assimilado, dificilmente é erradicado” (MARTINS, 1998a, p. 300). Também, esperamos que estas reflexões alcancem os pareceristas de periódicos, em especial aqueles indexados na área de Ensino, pois uma incongruência conceitual publicada, não é apenas um erro assimilado, mas uma incongruência legitimada, uma falsificação convertida em “verdade”.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Essa seção compõe o primeiro momento de nossa pesquisa, uma síntese conceitual da relação massa-energia que é a fundamentação teórico-metodológica da pesquisa proposta no presente artigo que subsidia as nossas análises. O material que serviu de base para essa síntese foram os trabalhos de Poincaré (1900), Einstein (1905), Lorentz (1912), Langevin (1913), Ives (1952), Whittaker (1953), Warren (1976), Stachel e Torretti (1982), Fadner, (1988), Martins (1989, 1998a, 2005a, 2012, 2015), Nunes e Queirós (2020). A seção foi dividida em quatro subseções. A primeira faz uma apresentação sucinta da gênese e o desenvolvimento da relação massa-energia². As duas subseções seguintes discutem dois erros conceituais envolvendo essa relação: a possibilidade de interconversão de massa em energia (e vice-versa) e a equivalência entre massa e energia. Na última subseção apresentamos os limites de validade da relação massa-energia e quais são as interpretações adequadas dela.

ASPECTOS HISTÓRICOS DA RELAÇÃO MASSA-ENERGIA

² Embora, nosso objetivo seja analisar a conceitualização da relação massa-energia, entendemos que o sentido e o significado dos objetos físicos são sínteses históricas, donde a necessidade desta subseção.

Embora a relação massa-energia tenha se tornado notória com a Teoria da Relatividade Especial, em particular com o trabalho de Einstein (1905), a sua história começa antes (FADNER, 1988; MARTINS, 1989, 2015). A origem dessa relação encontra-se nos estudos sobre a dinâmica do elétron, ocorridos no final do século XIX (MARTINS, 1989, 2015), cujo primeiro registro histórico aparece em um trabalho de Poincaré, publicado em 1900, com o título O Princípio da Reação na Teoria de Lorentz (POINCARÉ, 1900; FADNER, 1988; MARTINS, 2015). A partir do Princípio da Relatividade³ e da hipótese que a radiação se comportaria como um fluido fictício, Poincaré mostrou que a radiação apresentaria uma inércia dada pela razão de sua energia E , pela velocidade da luz ao quadrado (POINCARÉ, 1900):

$$m = \frac{E}{c^2} \quad (1)$$

Em 1903, o físico e empresário italiano, Olinto de Pretto, chegou ao mesmo resultado de Poincaré (FARIAS; BASSALO, 2010), porém seu trabalho teve pouca circulação e parece ter passado despercebido por seus contemporâneos. Em 1904, F. Hasenöhrl mostrou que uma caixa, cujo interior é toda espelhada e cheia de radiação apresentava uma inércia maior em relação a uma caixa idêntica e sem radiação (FADNER, 1988; MARTINS, 1989, 2015); ele derivou o aumento desta inércia, mas cometeu um erro de integração, que foi corrigido, em 1905, por Abraham, que estabeleceu o resultado de $m = (4/3) E/c^2$ (IVES, 1952; FADNER, 1988; MARTINS, 1989, 2015).

Embora o resultado de Haenhörl e Abraham seja diferente do resultado obtido por Poincaré, e, posteriormente, por Einstein, não há nenhum erro (MARTINS, 2015). Em 1905, Poincaré mostrou que o elétron estava sujeito a pressões negativas que resultava em uma redução da inércia em um fator de 1/3 (Martins, 2015). Assim, se uma caixa

³ “O princípio da relatividade, segundo o qual as leis dos fenômenos físicos devem ser idênticas, esteja o observador em repouso, esteja o observador em movimento de translação uniforme; de modo que não temos, nem podemos ter, nenhum meio de discernir se somos ou não levados por tal movimento”. (POINCARÉ, 1904, p. 306, tradução nossa).

estivesse cheia de radiação, haveria um aumento de $m = (4/3) E/c^2$ e uma redução de $(1/3) E/c^2$, o que nos leva a um aumento de inércia igual a E/c^2 .

Ainda em 1905, após a publicação dos trabalhos de Abraham, Hasenöhrle e Poincaré, Einstein também derivou essa relação, como uma consequência do Princípio da Relatividade (MARTINS, 1989, 2015). Entre 1906 e 1907, Planck e Einstein estabeleceram os limites de validade da relação massa-energia e obtiveram uma nova relação: a relação massa-entalpia (MARTINS, 2012, 2015). No decorrer do século XX, houve outros desdobramentos importantes envolvendo essa relação, como aquele apresentado por Dirac que estabelecia a existência de energia negativa, porém, para os fins dessa pesquisa, esse breve recorte histórico é mais do que suficiente.

HÁ CONVERSÃO ENTRE MASSA E ENERGIA (E VICE-VERSA)?

Ao longo da pesquisa, percebemos inúmeros equívocos e como aponta Warren (1976), a maior deturpação da relação $E = mc^2$ é a que afirma que a massa pode ser convertida em energia e vice-versa. Segundo o autor, nas últimas décadas, tornaram-se comuns novas interpretações da relação massa-energia, mas além de estarem em desacordo com a Teoria da Relatividade Especial carecem de coerência lógica (WARREN, 1976, p. 52).

Alguns autores, ao defenderem a possibilidade de transformação de massa em energia (e vice e versa), propõem fundir o princípio da conservação de energia e o princípio da conservação de massa em um único princípio de conservação da massa-energia. Contudo, essa sugestão é inadequada, pois:

Se a energia pudesse se transformar em massa, teríamos várias consequências estranhas. Em primeiro lugar, a energia não se conservaria pois, quando surgisse massa, desapareceria energia. Seria a soma $E + m.c^2$ que se conservaria. Em segundo lugar, se a equação $E=m.c^2$ for válida e, além disso, a energia puder ser transformada em massa, nem a massa nem a energia se conservam. No entanto, tanto a massa quanto a energia se conservam. Essa interpretação está equivocada. Suponhamos que um corpo A recebe calor do corpo B. Tanto a energia quanto a massa de A vão aumentar, e tanto a massa quanto a energia de B vão diminuir. A energia total do sistema e a massa total do sistema A + B são constantes. [...] [Portanto], se tanto a massa quanto a

energia se conservam, é claro que um não pode se converter ou transformar no outro. (MARTINS, 2012, p. 125-127).

Martins (2012, p. 127) também explica por que as evidências empíricas que alguns autores recorrem para justificar a transformação de massa em energia são insustentáveis,

Consideremos agora um exemplo que é muitas vezes citado como "prova" de transformação de massa em energia: um elétron e um pósitron podem se aniquilar, produzindo dois ou três fótons de radiação γ . Nesse caso, se não levarmos em conta a massa maupertuisiana dos fótons, a massa não se conservaria; mesmo assim, seria inadequado falar em transformação de massa em energia, pois a energia total inicial é igual à energia total final. Se levarmos em conta a massa maupertuisiana da radiação γ , tanto a massa quanto a energia se conservaram. [...]. Muitas vezes, as pessoas que falam sobre transformação de massa em energia estão confundindo massa com matéria e energia com radiação. Na aniquilação de um elétron e um pósitron temos, inicialmente, matéria (em certo sentido); depois da aniquilação não temos matéria, mas temos radiação. Teríamos, assim, uma transformação de matéria (massa) em radiação (energia). Na física clássica, a massa era realmente identificada com a quantidade de matéria do corpo. No entanto, na teoria da relatividade, o conceito é muito diferente. Se matéria e massa fossem o mesmo conceito, não poderíamos falar sobre a- variação de massa de uma determinada quantidade de matéria, quando essa matéria é acelerada. Da mesma forma, não se deve identificar os conceitos de energia e radiação. A radiação tem energia, mas um corpo material também tem energia.

Desta forma, vemos que não é possível sustentar que massa (ou matéria) se converta em energia (e vice-versa) ou que esta relação funde os princípios de conservação da massa e energia em um único princípio: a conservação da massa-energia. Porém, como destacam Martins (1998, 2012) e Nunes e Queirós (2020), a conversão entre massa e energia não é a única concepção equivocada, que vem sendo difundida sobre essa equação. Outra incongruência frequente é de que a relação massa-energia estabelece uma equivalência entre essas grandezas. Na seção a seguir, apresentaremos um argumento para contestar esta relação de equivalência entre massa e energia.

EXISTE EQUIVALÊNCIA ENTRE MASSA E ENERGIA?

Uma concepção bastante difundida é de que a relação massa-energia estabelece a possibilidade de transformação de massa em energia (e vice-versa) ou uma equivalência entre estas duas grandezas. Martins (2012), Nunes e Queirós (2020) apresentam argumentos contra essas interpretações. Em lógica, dizemos que duas expressões são

equivalentes se elas apresentarem a mesma extensão (cf. MILLER, 2010), como por exemplo: “estrela matutina”⁴ e “estrela vespertina”⁵ são expressões equivalentes, cuja extensão é o planeta Vênus. As palavras portuguesa e inglesa, respectivamente, “Mesa” e “Table” são equivalentes, pois se referem ao mesmo objeto.

No caso de diferentes medidas, diremos que uma condição necessária⁶ para que sejam equivalentes, deve se referir a mesma grandeza física (GIBBINGS, 2011). O exemplo clássico é a equivalência entre calor e energia, $1 \text{ cal} = 4,184\text{J}$. Dentro da análise dimensional, podemos reconhecer as grandezas fundamentais, como a Massa, e as grandezas derivadas das fundamentais, como a Energia (GIBBINGS, 2011).

Por outro lado, podemos conceder que a escolha entre fundamental e derivado é convencional, mas devem ser preservadas as relações entre as grandezas. Assim, poderíamos construir um sistema igualmente coerente onde a Energia, por exemplo, é a grandeza fundamental. A partir dessas informações, podemos avaliar se é, logicamente, possível afirmar que Massa e Energia são equivalentes.

Para que exista equivalência entre Inércia e Energia é necessário que elas se refiram a mesma Grandeza. Mas, enquanto a Massa é uma grandeza fundamental, a Energia é uma grandeza derivada. Logo, são grandezas diferentes, com extensões diferentes e, desta forma, não podem ser equivalentes. Chamaremos essa Linguagem de padrão (*standard*) e denotaremos por P. No entanto, poderíamos procurar uma Linguagem L, não *standard*, onde ainda se verificasse, nas mesmas condições de P, a relação massa-energia, mas em L, Massa e Energia seriam duas grandezas fundamentais, para então, verificarmos a possibilidade de estabelecermos uma equivalência entre elas. Desta forma, o que estamos procurando é uma Linguagem L, onde verificam-se as seguintes premissas:

P1: A Linguagem L admite a construção da TRE por meio dos processos estabelecidos por Poincaré (1905, 1906) e Einstein (1905).

⁴ Estrela Matutina é o nome dado a ocorrência no céu do planeta Vênus logo antes do alvorecer.

⁵ Estrela Vespertina é o nome dado a ocorrência no céu do planeta Vênus logo após o entardecer.

⁶ Para uma lista exaustiva dessas condições, ver Gibbings (2011, p. 27-28).

T1: Por P1, decorre que a relação massa-energia, $E = mc^2$, é verificada nas mesmas circunstâncias que foram estabelecidas pela Linguagem P (*standard*) da TRE.

P2: Massa (m) e Energia (E) são grandezas físicas fundamentais.

Agora, verificaremos se em L se a constante c é uma grandeza física fundamental ou derivada. Para realizarmos essa análise, vamos isolar a constante c na equação (1):

$$c = \sqrt{\frac{E}{m}} \quad (2)$$

Poderia c ser uma grandeza fundamental? A resposta é não, pois, por P2, as duas grandezas físicas no radicando são fundamentais e a razão entre duas grandezas fundamentais é uma grandeza derivada (GIBBINGS, 2011). Mas, se c é uma grandeza derivada, então ela é composta por grandezas fundamentais e, por P1, sabemos que estas grandezas fundamentais são o *espaço* e o *tempo* (cf. POINCARÉ, 1905, 1906; EINSTEIN, 1905b). Desta forma, podemos reescrever a equação (1), da seguinte forma:

$$m = \frac{E}{\left(\frac{ds}{dt}\right)^2} \quad (3)$$

Como a razão de grandezas físicas fundamentais é uma grandeza física derivada (GIBBINGS, 2011), então, concluímos que a Massa m , é uma grande física derivada. Porém, essa conclusão é um absurdo, pois P₂ afirma que m é fundamental.

Portanto, constatamos que não existe Linguagem L onde é válida, nas condições de P, a relação massa-energia e que as grandezas m e E sejam simultaneamente, grandezas fundamentais. Assim, concluímos que Massa e Energia não podem ter a mesma extensão e, portanto, não existe, em nenhuma Linguagem P ou L, equivalência entre Massa e Energia.

O SIGNIFICADO DA RELAÇÃO MASSA-ENERGIA ($E = mc^2$)

Recebido em: 20/01/2023

Aceito em: 20/03/2023

Nos itens anteriores mostramos algumas interpretações equivocadas da Relação Massa-Energia. Nesse item introduziremos duas interpretações adequadas e que recuperam a sua validade restrita (local). Para isso iremos tomar como base os trabalhos de Poincaré (1900), Einstein (1905a), Lorentz (1912), Langevin (1913) e as discussões promovidas por Ives (1952), Whittaker (1953), Warren (1976), Stachel e Torretti (1982), Fadner, (1988) e Martins (1989, 1998, 2005a, 2012, 2015),

[EST]: Condição de Einstein-Stachel-Torretti: *A relação massa-energia é válida em uma região do espaço-tempo onde se verificam “o princípio da relatividade, a lei da conservação da energia, a existência de um limite newtoniano para a dinâmica relativística e a lei relativística da transformação da energia de uma onda eletromagnética.”* (STACHEL, TORRETTI, 1982, p. 762).

Para qualquer sistema físico que satisfaça **[EST]**, podemos apresentar duas interpretações válidas para relação Massa-Energia ($E = mc^2$).

[I₁] Interpretação de Poincaré: *Algumas formas de Energia, cuja magnitude é E , apresentam uma inércia m , cuja magnitude é dada por $m = E/c^2$ (cf. POINCARÉ, 1900; LANGEVIN, 1913; MARTINS, 1989, 2012, 2015)⁷.*

[I₂] Interpretação de Einstein-Martins: *“Se a energia total de um sistema isolado é E , então esse sistema tem uma massa inercial $m = E/c^2$ ”* (MARTINS, 2012, p. 123; cf. EINSTEIN, 1905a; LORENTZ, 1912; MARTINS, 1998b, 2005, 2015)⁸.

Assim, **[EST]** determina sobre quais circunstâncias a relação massa-energia é válida (portanto, ela não é uma Lei Universal), enquanto **[I₁]** e **[I₂]**, fornecem as leituras adequadas dessa relação, além de impor duas novas restrições, a saber: *(i) a relação não se aplica a todas as formas de energia; (ii) a relação só se aplica a sistemas isolados.*

⁷ A determinação das formas de energia que apresentam uma inércia não pode ser estabelecida *a posteriori*. Para detalhes, veja Whittaker (1953), sobre a inércia da energia gravitacional, e Martins (1989) sobre a ausência de inércia na energia potencial elétrica.

⁸ Para sistemas fechados, deve-se recorrer a relação massa-entalpia, deduzida por Planck em 1906 (MARTINS, 2012).

A partir dessas considerações, propomos a seguinte leitura para a relação massa-energia: “*Nas condições definidas por [EST], certas formas de energia apresentam uma inércia e para um sistema isolado, a inércia de um sistema isolado será uma medida de sua energia total. Nos dois casos, essa inércia é dada por $m = E/c^2$.*”. No próximo item, discutimos como a relação massa-energia pode ser ensinada.

O ENSINO DA RELAÇÃO MASSA-ENERGIA ($E = mc^2$)

No que concerne ao ensino, além das prescrições discutidas acima, recomendamos que o educador não faça uso de exemplos para justificar como essa relação foi “provada”, “comprovada” ou “verificada”. Do ponto de vista lógico e epistemológico, uma teoria ou uma lei jamais podem ser “provadas”, “comprovadas” ou “verificadas”⁹ (CHALMERS, 1993; DUTRA, 2017; DA COSTA, 2018). Ao invés disso, o educador deverá enfatizar que nas condições descritas [EST], a relação massa-energia tem se mostrado válida¹⁰. Investigações científicas posteriores poderão levar a modificações da condição [EST], modificando os seus limites de aplicação. Essa abordagem destaca o caráter dinâmico e provisório da ciência.

No que concerne aos exercícios, aconselhamos que o educador faça uso de questões conceituais e situações-problemas onde os educandos precisam decidir com base em [EST], [I₁] e [I₂]. Nos exercícios numéricos, peça aos educandos que expliquem com as suas palavras os cálculos, interpretem os resultados e façam uma descrição geral do problema e a sua solução.

Outra atividade que sugerimos é a leitura e análise crítica de textos, por exemplo, de divulgação científica que apresentem acertos e distorções na conceituação da relação massa-energia. Nessa atividade, os educandos irão ler textos que abordam a relação massa-energia, indicando e justificando quais foram os acertos e incongruências.

⁹ Mesmo a falsificação é um conceito deveras problemático e deve ser abordado com cautela (MARTINS, 1986; CHALMERS, 1993; DUTRA, 2017; DA COSTA, 2018).

¹⁰ Recomendamos não utilizar a expressão “verdadeira” e seus cognatos, pois, de uma perspectiva epistemológica, de fato não se trata da “verdade”, mas daquilo que se cognomina de “verdade pragmática” ou “quase-verdade” (DA COSTA, 2018).

Posteriormente, eles deverão reescrever o texto fazendo as modificações necessárias para que o texto se torne adequado. Depois, esses textos podem ser revisados pelos outros educandos, promovendo uma circulação de ideias e construção coletiva do conceito da relação massa energia do conteúdo de relatividade restrita.

Por fim, entendemos que a presente fundamentação teórica sobre a relação massa-energia do conteúdo de relatividade restrita também poderá subsidiar a construção de sequências didáticas de Ensino tanto no Ensino Médio, quanto no Ensino Superior em específico em cursos de bacharelado e formação de professores de Física. De nossa parte, após essas colocações, damos por concluído essa seção e passamos a descrever a metodologia empregada.

METODOLOGIA

Este trabalho fundamenta-se em uma pesquisa bibliográfica, pois este tipo de pesquisa possibilita a compreensão daquilo que já foi pesquisado e dos principais resultados obtidos (ROSA, 2013). Em outras palavras:

É um apanhado geral sobre os principais trabalhos já realizados, revestidos de importância, por serem capazes de fornecer dados atuais e relevantes relacionados com o tema. O estudo da literatura pertinente pode ajudar a planificação do trabalho, evitar publicações e certos erros, e representa uma fonte indispensável de informações, podendo até orientar as indagações (MARCONI; LAKATOS, 2003, p. 158).

Para o processo de seleção de documentos, foram realizadas buscas em todo o banco de dados das plataformas digitais do Scielo (Scientific Electronic Library Online), ERIC (Education Resources Information Center), Google Acadêmico e Redalyc (Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal), a partir das seguintes palavras-chave: “teoria da relatividade restrita”; “relação massa-energia”; “massa-energia”; “relatividade especial” e “ $E=mc^2$ ” e suas respectivas traduções para o inglês.

Para compor o *corpus*, os artigos encontrados foram inspecionados para saber se apresentavam discussões acerca da relação massa-energia. Essa inspeção foi feita de duas

formas: uma inspeção visual cujo objetivo foi identificar a ocorrência da equação “ $E = mc^2$ ” e a busca pelas palavras-chave “relação massa-energia”; “massa-energia” e “ $E=mc^2$ ” (e suas respectivas traduções, em documentos em língua estrangeira) por meio da ferramenta de busca “pesquisar no documento”. Os poucos arquivos em que não foi possível utilizar a ferramenta “pesquisar no documento”, foram lidos na íntegra.

Os artigos do *corpus* foram analisados, com base nos elementos apresentados na Fundamentação Teórica (seção 2) e sintetizados conceitualmente em dois itens denominados de [b1]: “Conversão entre massa e energia” e [b2]: “Equivalência entre massa e energia”. Conforme discutimos na seção 2, esses dois itens [b1] e [b2] incorrem em distorções conceituais da relação massa-energia. Como nosso *corpus* de artigos a serem analisados podem apresentar equívocos e acertos da relação conceitual massa-energia, classificamos os artigos que apresentam acertos da relação massa-energia como “*Adequados*” e os que apresentam equívocos como “*Inadequados*”. Na próxima seção apresentamos estes resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, foram encontrados 171 trabalhos. No entanto, optamos apenas por trabalhos publicados em periódicos, assim, os publicados em eventos, dissertações e teses foram desconsiderados. Em seguida, por meio de uma leitura inspeccional, foram examinados os títulos e os resumos de cada um dos artigos em busca daqueles que tivessem relação com a temática. Por fim, foram selecionados 30 artigos que abordavam a relação massa-energia, que foram lidos em sua totalidade. Abaixo, no Quadro 1, estão listados os artigos que compõem o corpus da pesquisa.

Quadro 1 – Listagem dos artigos selecionados.

#	Artigo	Autor (Ano)
[a1]	A relação massa-energia e energia potencial	Martins (1989)
[a2]	Mass and energy: the low-energy limit	Bauman (1994)
[a3]	Como Distorcer a Física: Considerações sobre um Exemplo de Divulgação Científica 2- Física moderna	Martins (1998)

[a4]	E = mc ² : Origem e Significado	Lemos (2001)
[a5]	Relatividade Restrita no Ensino Médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de Física	Ostermann e Ricci (2004)
[a6]	Uma comparação entre deduções da equação E = mc ²	Vieira <i>et al</i> (2004)
[a7]	A dinâmica relativística antes de Einstein	Martins (2005a)
[a8]	Física e História	Martins (2005b)
[a9]	Conceptual development of Einstein's Mass-Energy relationship	Leong e Chin (2005)
[a10]	O Princípio da Relatividade – de Galileu a Einstein	Seixas (2005)
[a11]	Construção de conceitos de física moderna e sobre a natureza da ciência com o suporte da hipermídia	Machado e Nardi (2006)
[a12]	Uma visão do espaço na mecânica newtoniana e na teoria da relatividade de Einstein	Porto e Porto (2008)
[a13]	Einstein on mass and energy	Hecht (2009)
[a14]	How Einstein discovered $E_o = mc^2$	Hecht (2012)
[a15]	Constructing conceptual meaning from a popular scientific paper—the case of E = mc ²	Kapon (2013)
[a16]	História e a filosofia da ciência: caminhos para a inserção de temas física moderna no estudo de energia na primeira série do Ensino Médio	Morais e Guerra (2013)
[a17]	Mass as a form of Energy in a simple example	Dib (2013)
[a18]	O grupo de estudos e discussão como subsídio ao desenvolvimento de interações discursivas entre professores de física sobre a temática teoria da relatividade	Silva <i>et al</i> (2013)
[a19]	On the Philosophical Nature of Einstein's Mass-Energy Equivalence Formula E=mc ²	Mamedov e Esmer (2014)
[a20]	A gênese da bomba	Carvalho (2015)
[a21]	A teoria da relatividade restrita e os livros didáticos do Ensino Médio: discordâncias sobre o conceito de massa	Jardim, Otoy e Oliveira (2015)
[a22]	Einstein e a Relatividade entram em cena; diálogos sobre o teatro na escola e um ensino de física criativo	Oliveira e Gomes (2016)
[a23]	Análise da história da Teoria da Relatividade Restrita em livros didáticos do terceiro ano do ensino médio indicados no PNLEM 2015/2017	Silva <i>et al</i> (2019)
[a24]	Doze mitos sobre a Teoria da Relatividade que Precisamos Superar	Nunes e Queirós (2020)
[a25]	Os temas e usos de interesse dos estudantes no livro didático de Física	Artuso (2020)

[a26]	Uma introdução à Física de Partículas para o Ensino Médio: uma tradução adaptada do texto de Bettelli, Bianchi-Streit e Giacomelli	Schäffer, Schumacker e Orengo (2020)
[a27]	A simple thought experiment to discuss the mass–energy equivalence in the special theory of relativity	Duarte e Lima (2021)
[a28]	Conceitos da Teoria da Relatividade Restrita de Einstein em livros didáticos: uma abordagem na perspectiva do Ensino Médio	Santana, Santos e Takiya (2021)
[a29]	Conceito de massa e a relação massa-energia no conteúdo de relatividade especial em livros didáticos de física	Nunes, Queirós e Cunha (2022)
[a30]	Reflections and Physical-Mathematical Connections: A bibliographical review highlighting equivalences between mass-energy	Amaral e Neto (2022)

Fonte: Autoral, 2023.

Destes 30 artigos, 9 foram alocados em “Adequados” e 21, em “Inadequados”. Isso significa que do total do *corpus*, apenas 30% fazem uma apresentação correta da relação massa-energia. O Quadro 2, sintetiza essa distribuição.

Quadro 2 – Organização dos artigos por categoria.

Categorias	Artigos	Total	%
Adequados	[a1], [a3], [a7], [a8], [a9], [a21], [a23], [a24], [a29]	9	30%
Inadequados	[a2], [a4], [a5], [a6], [a10], [a11], [a12], [a13], [a14], [a15], [a16], [a17], [a18], [a19], [a20], [a22], [a25], [a26], [a27], [a28], [a30]	21	70%

Fonte: Autoral, 2023.

Dos artigos categorizados como “*Inadequados*”. A análise revelou a ocorrência das duas inconsistências conceituais discutidas na seção 2: [b1]: “Conversão entre massa e energia” e [b2]: “Equivalência entre massa e energia”. O primeiro tipo, [b1] é composto por artigos onde é afirmado que a relação massa-energia estabelece a possibilidade de conversão de massa em energia (e vice-versa); o segundo, [b2], inclui os artigos que afirmam que massa e energia são grandezas físicas equivalentes. O Quadro 3, apresenta a distribuição de incongruências por artigo:

Quadro 3 – Tipologia das inadequações conceituais (em ordem crescente).

#	Categorias	Artigos	Total	%Rel.	%Abs.
[b1]	Conversão entre massa e energia	[a4], [a6], [a13], [a14], [a15], [a18], [a19], [a22], [a26], [a28], [a30]	11	52,38%	36,67%

[b2]	Equivalência entre massa e energia	[a2], [a4], [a5], [a6], [a10], [a11], [a12], [a13], [a14], [a15], [a16], [a17] [a18], [a19], [a20], [a25], [a26], [a27], [a28], [a30]	20	95,24%	63,33%
------	------------------------------------	---	----	--------	--------

Fonte: Autorial, 2023.

As informações obtidas por meio da análise dos artigos serão discutidas a seguir e estão organizadas de acordo com cada um dos tipos apresentados anteriormente.

[b.1]: CONVERSÃO ENTRE MASSA E ENERGIA

O segundo equívoco mais comum que detectamos em nossa análise é a afirmação de que a relação massa-energia estabelece uma interconversão entre essas duas grandezas físicas. Esse equívoco ocorre em 11 dos artigos classificados como “*Inadequados*”.

É afirmado pelos autores que a relação massa-energia estabelece a conversão entre as duas grandezas. Por exemplo, em [a4: p. 5], o autor afirma que o fator c^2 , é “(...) meramente o fator de conversão entre as unidades de massa e energia” (afirmações semelhantes podem ser vistas em [a6: p. 94], [a13: p. 804], [a19: p. s.p.], [a22: p. 953] e [a28: p. 60]). Mais à frente, o autor de [a4: p. 8] exemplifica esse processo por meio “(...) desintegração de um *píon* neutro em dois fótons na reação $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ ” (outros documentos que recorrem aos processos nucleares ou de desintegração para confirmar suas afirmações são: [a18: p. 24] e [a26: p. 2]), exemplo, que como vimos na Fundamentação Teórica, trata-se de uma interpretação equivocada.

Um caso bastante curioso, ocorre no documento [a26]. Nesse trabalho, embora não se afirme que há conversão de massa em energia, mas de *matéria*, como podemos ver no título da seção 10: “*As Transformações da Energia-Matéria*”. Além disso, nessa seção, encontramos a seguinte passagem a seguir:

Nessas colisões, parte da energia cinética é transformada em matéria e em formas de massa das novas partículas criadas. Esta possibilidade de criar novas partículas torna a física de partículas completamente diferente da física atômica e nuclear, apesar de fótons também serem criados em transições atômicas e nucleares (SCHÄFFER, SCHUMACKER, ORENGO, 2020, p. 2).

Trata-se de erro ainda mais grave (MARTINS, 2012), pois nesse caso, há uma confusão entre *massa* e *matéria*, bem como entre *energia* e *radiação*. Embora o documento [a26] seja uma tradução, em momento algum os autores escrevem uma nota explicativa alertando o leitor sobre o equívoco.

Em quatro artigos ([a13], [a15], [a19], [a28]), encontramos a afirmação de que a relação massa-energia revoga os princípios de conservação de massa e de energia e exige um princípio unificado: a conservação da Massa-Energia. No documento [a19: p. 321], os autores são categóricos quando afirmam que: “(...) Einstein unificou a lei da “conservação da matéria” e a lei da “conservação da energia” em uma única lei chamada “Lei da conservação da massa-energia”. O autor de [a13] também recorre a Einstein para sustentar a existência de um Princípio da Conservação da Massa-Energia:

Einstein era inequivocamente contra a ideia tradicional de conservação da massa. Ele havia concluído que massa e energia eram essencialmente a mesma coisa; “massa inerte é simplesmente energia latente.” Ele tornou sua posição conhecida publicamente várias vezes: “a massa inercial de um corpo depende de seu conteúdo de energia.... Este teorema subverte o princípio da conservação da massa, ou melhor, funde-o com o princípio da conservação da energia num único princípio.” (HECHT, 2009, p. 804).

Em [a15: p. 91], a autora contesta o ensino dogmático, que apenas informa aos alunos que “(...) Einstein unificou a conservação da energia e a conservação da massa em uma lei de conservação da energia ao considerar a massa como uma forma de energia, uma relação que é capturada pela expressão $E = mc^2$.” Desta forma, a autora desenvolve uma proposta didática, impulsionada pela história da relatividade, para mostrar como Einstein demonstrou, com a Teoria da Relatividade Especial, que o princípio de conservação de massa estava inadequado e como, a partir da relação massa-energia, Einstein operou a unificação dos princípios de conservação de energia e de massa em uma única lei de conservação.

No ensaio [a28: p. 73], após analisarem como são abordados os conceitos de Teoria da Relatividade Especial nos Livros Didáticos (LDs) do Ensino Médio, os autores apresentam à seguinte conclusão:

Do exposto, realizada a análise dos LDs pesquisados, no que diz respeito à discordância entre os autores sobre a relação de massa e energia na TRR, cabe dizer que a separação clássica das leis de conservação da massa e da energia é defeituosa. Nem massa nem energia sozinhas por elas mesmas se conservam nos processos naturais. A quantidade, na verdade, conservada – Massa-Energia – combina massa e energia levando em consideração suas equivalências. Assim, em contraste com a teoria clássica, na TRR, o conceito que envolve massa e energia antes separados, torna-se um único chamado Massa-Energia. Isso resolve as aparentes discordâncias, pois trata-se agora de um único conceito, o que torna sem efeito as comparações de ambos, massa e energia, que decorrem da defeituosa separação.

Os demais documentos ([a14], [a18], [a30]), apenas enunciam que a equação estabelece uma transformação entre massa e energia e, alguns deles, ilustram com exemplos envolvendo a produção de energia em usinas, bombas e outros processos de fissão nuclear. Enfatizamos que esses exemplos, além de estarem conceitualmente equivocados, eles são epistemologicamente inadequados, pois, são usados para mostrar como a relação foi “verificada” (“provada”).

[b.2]: EQUIVALÊNCIA ENTRE MASSA E ENERGIA

A afirmação de que a relação massa-energia estabelece uma equivalência entre essas duas grandezas foi a incongruência mais frequente, tendo aparecido em quase todos os artigos da categoria “*Inadequados*”, representando o montante de 63,33% dos artigos do corpus. Em quatro ([a5], [a19], [a27], [a30]) dos 21 artigos essa incongruência é detectada no próprio título. Em três ([a5], [a6], [a27]), ela aparece nas palavras-chaves. Dois documentos merecem atenção: [a2] e [a5]. Nestes dois artigos, os autores são enfáticos e argumentam que massa não pode ser convertida em energia, porém, ambos utilizam a expressão “equivalência” ao se referir a relação massa energia¹¹.

No que concerne aos usos dessa expressão pelos autores, identificamos duas tendências. A primeira, presente nos ensaios [a13], [a14], [a15], [a17] e [a19] afirmam

¹¹ [a2]: “A afirmação de que massa e energia são equivalentes não significa que uma pode ser convertida na outra. Nos diz que a inércia, m , de qualquer corpo ou sistema, é uma medida da energia desse corpo. A inércia aumenta à medida que a energia aumenta, ou a inércia diminui à medida que a energia diminui” (BAUMAN, 1994, p. 340, tradução nossa).

[a5]: “Além disso, é atribuído um significado errado à relação massa-energia, como se massa e energia fossem a mesma grandeza, podendo ser convertidas uma na outra.” (OSTERMANN, RICCI, p. 2004, p. 96).

que massa e energia são idênticas [a13] e [a14] ou que massa é uma forma especial de energia ([a15], [a17], [a19]). Já a segunda tendência, observada nos demais artigos, sugere que essa expressão vem sendo usada como um “vício” ou “abuso” de linguagem. Na maioria dos artigos analisados ou os autores nomeiam a relação massa-energia de “equivalência massa-energia” ou apenas dizem que a relação estabelece uma equivalência entre essas duas grandezas (*e.g.*, [a28: p.59]: “essa expressão tão simples relaciona duas grandezas fundamentais ao estabelecer uma equivalência entre elas: massa e energia”) ou como Einstein estabeleceu a equivalência entre massa e energia (*e.g.*, [a12]: p. 5).

O artigo [a20: p. 198] é um dos poucos que mencionam as contribuições de Poincaré, como podemos ver na seguinte passagem: “(...) em 1900, [Poincaré] entrevia uma equivalência entre massa e energia (Poincaré, 1900)”. Porém, o autor se equivoca quando afirma que Poincaré sugeriu que a relação massa-energia entrevia uma equivalência entre essas duas grandezas. Como discutimos na seção 2, o que Poincaré (1900) sugere nesse ensaio é que certas formas de energia poderiam apresentar uma inércia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo geral investigar a forma como a relação entre massa-energia é conceitualizada em artigos de periódicos científicos em que muitos são usados por pesquisas na área de Ensino. A análise revelou que 70% dos artigos do *corpus* abordam a relação massa-energia de maneira equivocada. Dada a quantidade de informação, atualmente, acumulada e sendo produzida, é praticamente impossível que uma pessoa consiga estudar e averiguar todas as informações, donde a necessidade de se recorrer às revistas acadêmicas, pois estas deveriam ser confiáveis, devido aos métodos de revisão e avaliação pelos pares. Em outras palavras, erros conceituais graves ganham legitimidade e validação, tornando-se referência para estudantes, pesquisadores, educadores e leitores casuais. Por isso, consideramos grave a ocorrência elevada de artigos científicos com imprecisões conceituais, assim não sendo possível minimizar os equívocos denunciados nesta pesquisa.

Acreditamos que uma possibilidade de superação destas contradições, ainda persistentes, está na inserção de tópicos de História e Historiografia da Ciência, ministrados por historiadores e epistemólogos da ciência experientes ou por profissionais capacitados nesse campo (MARTINS, 2001) na formação acadêmica, tanto de licenciados quanto de bacharéis em ciências, até porque, não são raros os bacharéis que escrevem livros-textos ou acabam seguindo no campo da divulgação científica¹². Essas inserções capacitariam os acadêmicos no manuseio de fontes primárias e na seleção de boas fontes de consulta, acreditamos que seja possível ensinar conceitos científicos sem deformá-los, como temos visto com a famosa relação massa-energia. Testifica em favor dessa sugestão que, aqueles artigos que foram considerados nesta pesquisa adequados, foram escritos por autores com experiência ou familiaridade nas áreas de História e Historiografia da Ciência;

Outro aspecto que a nossa análise revelou e necessita ser discutido e problematizado é o processo de publicação e revisão por pares. Todos os artigos que avaliamos foram publicados em revistas acadêmicas, algumas referências na área de ensino de ciências. Estamos cientes de que o processo de revisão por pares não está imune a erros, porém, o nosso exame revela contradições concretas que precisam ser superadas para garantir o aprimoramento da área de ensino de ciências. Este é um assunto que deveria ser pautado pelos profissionais que exercem essa atividade vital para toda ciência.

Por fim, gostaríamos de fazer duas colocações. A primeira é que, embora muitos artigos tenham sido categorizados como “*Inadequados*”, isso não significa que todo o conteúdo deva ser descartado. Eles devem ser lidos com cautela, separando o “joio do trigo” e fazendo as devidas correções. Por exemplo, o trabalho de Stachel e Torretti (1982) apresenta resultados importantíssimos para compreender os limites de validade da relação massa-energia, porém, os autores fazem o uso da expressão “equivalência massa-energia”. A segunda colocação é que, em nosso exame preliminar, constatamos que alguns desses artigos apresentam problemas históricos e epistemológicos. Como

¹² Martins (1998a, 1998b, 2001), Nunes e Queirós (2020) e Santos e Halmenschlager (2021) denunciam a ocorrência de equívocos conceituais e históricos em obras de divulgação científica.

desdobramento dessa pesquisa, pretendemos em outras pesquisas fazer uma análise histórica e epistemológica dos estudos descritos nesses artigos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e com o apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS/MEC – Brasil.

REFERÊNCIAS

AMARAL, J. C. M; NETO, A. F. G. Reflections and Physical-Mathematical Connections: A bibliographical review highlighting equivalences between mass-energy. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v.8 (5): 1-11, 2022

ARTUSO, A. R. Os temas e usos de interesse dos estudantes no livro didático de Física. **Educar em Revista**, v. 36: 1-27, 2020.

BAUMAN. R. P. Mass and energy: the low-energy limit. **Phys. Teach**, v.32: 340-2. 1994.

CARVALHO, J. F. A gênese da bomba. **Estud. Avançados**, v.29 (84): 197-208, 2015.

CHALMERS, A. F. **O que é Ciência, Afinal?** 14ª reimpressão, São Paulo: Editora Brasiliense, 1993.

DA COSTA, N. C. A. **O Conhecimento Científico**. 3ª ed. São Paulo: Discurso Editorial, 2018.

DIB, C. O. Mass as a form of energy in a simple example. **Phys. Teach**, v.51: 546-8. 2013.

DUARTE, S.; LIMA, N. A simple thought experiment to discuss the mass–energy equivalence in the special theory of relativity. **Phys. Educ.**, v. 56 (3): s.p., 2021.

DUTRA, L. H. A. **Introdução à Teoria da Ciência**. 4ª ed. Florianópolis: EdUFSC, 2017.

EINSTEIN, A. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? **Ann Phys**, v. 323(13): 639–41, 1905a.

- EINSTEIN, A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. **Ann Phys**, v.322 (10): 639–41, 1905b.
- FADNER, W. L. Did Einstein really discover “ $E=mc^2$ ”? **Am. J. Phys.**, v.56 (2): 114-22, 1988.
- FARIAS, R. F. BASSALO, J. M. F. **Para Gostar de Ler a História da Física**. Campinas: Átomo, 2010.
- GIBBINGS, J. C. **Dimensional Analysis**. London: Springer. 2011.
- HECHT, E. Einstein on mass and energy. **Am. J. Phys.**, v.77 (9): 799-806, 2009.
- HECHT, E. How Einstein discovered " $E=mc^2$ ". **Phys. Teach**, v.50: 91-4, 2012.
- IVES, H. Derivation of the mass-energy relation. **J. Opt. Soc.**, v.42 (8): 540-3, 1952.
- JARDIM, W. T.; OTOYA, V. J. V.; OLIVEIRA, C. G. S. A teoria da relatividade restrita e os livros didáticos do Ensino Médio: discordâncias sobre o conceito de massa. **Rev. Bras. Ens. Fis.**, v.37 (2): 1-7, 2015.
- KAPON, S. Constructing conceptual meaning from a popular scientific paper—the case of $E = mc^2$. **Phys. Educ.**, v.48 (1): 90-5, 2013.
- LANGEVIN, P. L'inertie de l'énergie et ses conséquences. **J. Phys. Theor. Appl.**, v.3: 553-91, 1913.
- LEMOS, N. A. $E=mc^2$: Origem e Significado. **Rev. Bras. Ens. Fis.**, v.23 (1): 3-9, 2001.
- LEONG, W. C.; CHIN, Y. K. Conceptual development of Einstein's Mass-Energy relationship. **New Horiz. Educ.** (51): 56-66. 2005.
- LORENTZ, H. A. Sur la masse de l'énergie. **Arch. Néerl.**, v.2: 139-54, 1912.
- MACHADO, D.I.; NARDI, R. Construção de conceitos de física moderna e sobre a natureza da ciência com o suporte da hipermídia. **Rev. Bras. Ens. Fis.**, v.28 (4): 473-85, 2006.
- MAMEDOV, B. A; ESMER, M. Y. On the Philosophical Nature of Einstein's Mass-Energy Equivalence Formula $E=mc^2$. **Foundations of Science**, v.19 (4):319-329, 2014.
- MARCONI, M. A; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5ª ed., São Paulo: Atlas, 2003.

- MARTINS, R. A. A Popperian Evaluation of Einstein's Theory-Plus-Method. **Manuscrito - Rev. Int. Filos.**, 9 (2):95-124, 1986.
- MARTINS, R. A. A relação massa-energia e energia potencial. **Cad. Cat. Ens. Fís.**, v.6 (Número especial): 56-80, 1989.
- MARTINS, R. A. Como Distorcer a Física: Considerações sobre um Exemplo de Divulgação Científica 2- Física moderna. **Cad. Cat. Ens. Fís.**, v.15 (3): 265-300, 1998a.
- MARTINS, R. A. Como Distorcer a Física: Considerações sobre um Exemplo de Divulgação Científica 1- Física Clássica. **Cad. Cat. Ens. Fís.**, v.15 (3): 243-264, 1998b.
- MARTINS, R. A. Como Não Escrever sobre História da Física: Um Manifesto Historiográfico. **Rev. Bras. Ens. Fis.**, v.23 (1): 113-129, 2001.
- MARTINS, R. A. A dinâmica relativística antes de Einstein. **Rev. Bras. Ens. Fis.**, v.27 (1): 11-26, 2005a.
- MARTINS, R. A. Física e História. **Cienc. Cult.**, v.57 (30): 25-29, 2005b.
- MARTINS, R. A. **Teoria da Relatividade Especial**. São Paulo: Livraria da Física, 2012.
- MARTINS, R. A. **A Origem Histórica da Relatividade Especial**. São Paulo: Livraria da Física, 2015.
- MILLER, A. **Filosofia da Linguagem**. São Paulo: Paulus, 2020.
- MORAIS, A.; GUERRA, A. História e a filosofia da ciência: caminhos para a inserção de temas física moderna no estudo de energia na primeira série do Ensino Médio. **Rev. Bras. Ens. Fis.**, v.35 (1): 1-9, 2013.
- NUNES, C. L. C.; QUEIRÓS, W. P.; CUNHA, J. A. R. Conceito de massa e a relação massa-energia no conteúdo de relatividade especial em livros didáticos de física. **Revista de Enseñanza de La Física**, v.34 (1): 9-21, 2022.
- NUNES, C. L. C.; QUEIRÓS, W. P. Doze mitos sobre a Teoria da Relatividade que precisamos superar. **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v.37 (2): 531-73, 2020.
- OLIVEIRA, L. M.; GOMES, M. L. Einstein e a relatividade entram em cena; diálogos sobre o teatro na escola e um ensino de física criativo. **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v.33 (3): 943-61, 2016.

- OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. Relatividade Restrita no Ensino Médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de Física. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v.21 (1): 83-102, 2004.
- POINCARÉ, H. La théorie de Lorentz et le principe de réaction. *Arch. Néerl*, v. 5: 252-78, 1900.
- POINCARÉ, H. L'état et l'avenir de la Physique mathématique. *Bull. Math Sci*, v.28: 302-24, 1904.
- POINCARÉ, H. Sur la dynamique de l'électron. *C. R. Acad. Sci.*, v.140: 1504-8, 1905.
- POINCARÉ, H. Sur la dynamique de l'électron. *Rend. Circ. Mat. Palermo*, v. 21: 129-75, 1906.
- PORTO, C. M; PORTO, M. B. D. S. M. Uma visão do espaço na mecânica newtoniana e na teoria da relatividade de Einstein. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, v.30 (1): 1-8, 2008.
- ROSA, P. R. S. **Uma introdução à pesquisa qualitativa em ensino de ciências.** Campo Grande: Editora UFMS, 2013.
- SANTANA, I. L.; SANTOS, R. A.; TAKIYA, C. Conceitos da Teoria da Relatividade Restrita de Einstein em livros didáticos: uma abordagem na perspectiva do Ensino Médio. *Recital*, v.3 (1): 54-76, 2021.
- SANTOS, W. G.; HALMENSCHLAGER, K. R. Divulgação científica e visões deformadas sobre o trabalho científico: contribuições para o ensino de física a partir de análise de textos jornalísticos. *RIS.*, v 4 (4): 181-202, 2021.
- SCHÄFFER, D.; SCHUMACKER, F. K.; ORENGO, G. Uma introdução à Física de Partículas para o Ensino Médio: uma tradução adaptada do texto de Bettelli, Bianchi-Streit e Giacomelli. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, v.42: 1-22, 2020.
- SEIXAS, W. O Princípio da Relatividade – de Galileu a Einstein. *Rev. Bras. Hist. Mat.*, v.5 (10): 43-56, 2005.
- SILVA, A. G *et al.* Análise da história da Teoria da Relatividade Restrita em livros didáticos do terceiro ano do ensino médio indicados no PNLEM 2015/2017. *Lat.-Am. J. Phys.*, v.13 (4): 1-13, 2019.
- SILVA, A. G.; CARVALHO, H. A. P.; PHILIPPSEN, G. S. Ensino de Física Moderna no Ensino Médio: uma proposta didática para o estudo da evolução do modelo atômico. *Revista Insignare Scientia - RIS*, v.5 (3): 392-408, 2022.

SILVA, J. R. N. *et al.* O grupo de estudos e discussão como subsídio ao desenvolvimento de interações discursivas entre professores de física sobre a temática teoria da relatividade. **Rev. Bras. Pesqui. Educ. Cienc. (RBPEC)**, v.13 (1): 9-25, 2013.

STACHEL, J. TORRETTI, R. Einstein's First Derivation of Mass–Energy Equivalence. **Am. J. Phys.**, v.50 (2): 760-3, 1982.

VIEIRA, S. *et al.* Uma comparação entre deduções da equação $E=mc^2$. **Rev. Bras. Ens. Fis.**, v.26 (2): 93-8, 2004.

WARREN, J. W. The mystery of mass-energy. **Phys. Educ.**, v.11 (1): 52-4, 1976.

WHITTAKER, E. T. **A History of the Theories of Aether and Electricity**. Vol. 2. New York: American Institute of. Physics, 1953.