

De Mach ao 'novo experimentalismo': um resgate histórico-epistemológico de experimentos de pensamento

*From Mach to the 'new experimentalism':
a historical-epistemological approach of thought experiments*

Anabel Cardoso Raicik | Universidade Federal de Santa Catarina

anabelraicik@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6674-8466>

Luiz O. Q. Peduzzi | Universidade Federal de Santa Catarina

luizpeduzzi@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1113-4704>

RESUMO Experimentos de pensamento vêm sendo amplamente utilizados na história da ciência desde a Antiguidade. Contudo, somente por volta do século XIX eles passam a ser discutidos teoricamente, em termos de suas características e funcionalidades. Este artigo resgata estudos do físico e filósofo Ernst Mach, que acendem definitivamente as luzes sobre o potencial desses notáveis experimentos, considerações de Thomas Kuhn acerca desse conceito e a discussão do assunto a partir da menção a teses que surgem com o "novo experimentalismo". Através de um exemplo desenvolvido por Albert Einstein em sua obra *A teoria da relatividade especial e geral*, reflete-se sobre essa temática e suas potencialidades para o ensino das ciências naturais, da física em particular.

Palavras-chave: experimentos de pensamento – história da ciência – Ernst Mach (1838-1916) – Thomas Kuhn (1922-1996) – ensino de ciências.

ABSTRACT *Thought experiments have been widely used in the history of sciences in the antiquity. However, it was only around the 19th century that they began to be discussed theoretically, in terms of their characteristics and functionality. This article presents studies by the physicist and the philosopher Ernst Mach, who definitely shone the light on the potential of these remarkable experiments, Thomas Kuhn's considerations on the concept and the discussion of the subject from the mention of theses that arise with the "new experimentalism". Through an example developed by Albert Einstein in the book *The theory of special and general relativity*, a reflection is presented around this theme and its potentialities for the teaching of natural sciences, of physics in particular.*

Keywords *thought experiments – history of science – Ernst Mach (1838-1916) – Thomas Kuhn (1922-1996) – science education.*

Introdução

Em *On thought experiments* (versão inglesa do original em alemão), publicado em 1897, o físico e filósofo austríaco Ernst Mach (1838-1916) apresenta uma reflexão inicial sobre uma classe de experimentos que denominou de *Gedankenexperimente* – experimentos de pensamento. Nesse ensaio, ele traz à discussão um tema que, embora de aceitação acrítica até então, era recorrente em inúmeros episódios da história da ciência, e da física em particular. Além disso, ele destaca o papel da razão e das concepções teóricas e inatas, na elaboração, execução e análise de um experimento mental. “Não há dúvida”, afirma ele, “de que o experimento mental introduz as maiores transformações em nosso pensamento e revela os caminhos mais significativos de investigação” (Mach, 1972, p. 452-453).

Mach pode ser considerado o filósofo mais antigo a trazer à tona preocupações filosóficas e sistemáticas acerca de experimentos de pensamento; aqui indistintamente utilizados como sinônimos de mentais, pensados ou imaginados. Suas contribuições são relevantes não apenas pelo resgate histórico do tema, mas porque suas visões “são perspicazes, razoavelmente precisas e férteis” (Sorensen, 1998, p. 4).

É importante destacar, no entanto, que em 1793 o físico e filósofo alemão Geord Lichtenberg (1742-1799) empregou, em seus *Aforismos*, a noção de “experimentar com pensamentos e ideias” (Schildknecht, 1990); e que experimentar dessa forma era necessário para o progresso científico (Fehige e Stuart, 2014). Em 1811 o físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) utilizou a expressão “experimento mental” em seu artigo “*First introduction to general physics*” (Oersted, 1997; Fehige e Stuart, 2014). Ele sinaliza que, para além de experimentos concretos, pode-se elevar a arte experimental para os experimentos de pensamento. Isto é, “colocar nossa mente em [um estado de] atividade criativa a fim de desenvolver um conhecimento vivo e vigoroso” (Oersted, 1997, p. 295-296). O físico destaca que esse procedimento, que chama de método criativo, contribui para a busca de uma mente vital e vigorosa, pois “com outros métodos, geralmente, aprendemos porque devemos estar *convencidos* de que algo é como é e não *por que* realmente é” (p. 296). Oersted, desde sua formação acadêmica, demonstrou interesse na filosofia de Immanuel Kant (1724-1804) e é fazendo menção a ela que enfatiza que, mesmo sem ter se atentado aos experimentos de pensamento, Kant forneceu belos exemplos deles. Todavia, essa concepção kantiana não teve impacto e expressão no desenvolvimento histórico do conceito (Buzzoni, 2018).

De fato, foram os estudos de Mach que acenderam definitivamente as luzes sobre o potencial desses notáveis experimentos. Predecessores filosóficos que se preocuparam em argumentar e refletir sobre as funcionalidades e características de experimentos mentais são poucos, como lembra Ian Hacking (1936-). Além de Mach, pode-se citar – em termos gerais – Alexandre Koyré (1892-1964), algumas passagens em Karl Popper (1902-1994) e o clássico ensaio de Thomas Kuhn (1922-1996), “Uma função para as experiências mentais”.

Já a história da ciência evidencia que esses experimentos – que tiveram por um longo tempo sua validade tacitamente aceita – estão presentes nas reflexões de estudiosos, nas correspondências que trocam, em livros e artigos que escrevem desde a Antiguidade. Um dos primeiros e mais belos exemplos, recordam Brown e Fehige (2019), encontra-se no *De Rerum Natura*, de Lucrécio (94-50 a.C.) – ao evocar um paradoxo de Arquitas de Tarento (428-347 a.C.) acerca da infinitude do espaço. “O que acontece quando uma lança é arremetida, atravessando o limite do universo? Ela ricocheteia ou desaparece deste mundo?” (Harrison, 1995, p. 34).

Em seu *Tratado da esfera*, escrito no século XIII e usado até o final do século XVII como livro introdutório básico ao estudo da astronomia em várias universidades europeias, Johannes de Sacrobosco (1195-1256) persuade o leitor de que a Terra e o mar têm a forma arredondada recorrendo a um experimento de pensamento. Ele argumenta que, quando um barco se afasta da costa, um sinal luminoso emitido da terra firme deixa de ser avistado primeiro por um homem que se encontra na base do mastro de observação e depois por quem se situa no seu alto. Se a superfície da água fosse plana, aquele que estivesse ao pé do mastro seria o último a divisar o sinal, por estar a uma menor distância da fonte luminosa. Naturalmente, a experiência de que ele fala não podia ser realizada na prática, pois a diferença de percepção entre os dois observadores não seria discernível nem mesmo com o uso dos telescópios que vão surgir no começo do século XVII.

No século XIV, Nicolau Oresme (1325-1382) discute um notável experimento mental envolvendo o movimento relativo de dois barqueiros, que conclui pela impossibilidade de distinguir qual deles se encontra “realmente” em movimento. Estendendo esse resultado para o mundo supralunar de Aristóteles, Oresme afirma não ser possível sustentar a imobilidade da Terra pela simples inspeção visual do céu (Peduzzi, 2015a).

Nos *Quesiti et inventiones diverse* (“Diversas questões e invenções”), de 1546, escrito na forma de diálogos, Niccolò Tartaglia (1500-1557) sustenta que a trajetória de uma bala de arcabuz ou de canhão é sempre curva, vencendo as resistências de um duque relutante em aceitá-lo. Uma articulada sequência de experimentos imaginados compõe uma argumentação irretocável (Koyré, 1982).

Também Giordano Bruno (1543-1600) faz uso de experiências pensadas quando se contrapõe às objeções físicas levantadas contra o sistema copernicano. À luz da física do *impetus*, Bruno sustenta a noção de sistema físico. Nessa perspectiva, os corpos não têm lugares predefinidos no cosmo. Seus movimentos dependem do movimento do sistema a que pertencem. Assim, quando discute a queda de duas pedras soltas simultaneamente de uma mesma altura por diferentes observadores, um deles em uma embarcação que se movimenta com velocidade constante e outro fora dela, o “resultado encontrado” diverge drasticamente do esperado pela física peripatética (Koyré, 1986). O experimento contesta (mais uma vez) a física dominante à época, e isso, no momento histórico em que se encontra, é o que importa.

Experimentos mentais foram amplamente utilizados por Galileu Galilei (1564-1642) nas conversas entre Salviati, Sagredo e Simplicio, tanto no *Diálogo sobre os dois principais sistemas de mundo: ptolomaico e copernicano*, quanto em *Dois novas ciências*. O experimento dos globos em rotação, que Isaac Newton (1642-1727) desenvolve no *Principia* para sustentar a existência do espaço absoluto, é mais um exemplar. À luz da filosofia mecanicista, Christiaan Huygens (1629-1695), contemporâneo de Newton, lida com experimentos mentais quando discute colisões, seja no âmbito da própria mecânica, em seus estudos sobre choques elásticos (como seriam denominados posteriormente), ou da óptica, quando propõe a teoria ondulatória da luz.

O ciclo de Carnot e o demônio de Maxwell são exemplos significativos na termodinâmica. Na relatividade, Albert Einstein (1879-1955) explora estrategicamente o uso de experimentos mentais em muitas situações; como quando desenvolve a relatividade da simultaneidade e quando se vale do elevador para discutir o pensamento mais feliz de sua vida, no estabelecimento do princípio da equivalência. Na física quântica, os exemplos se multiplicam, com o microscópio de raios gama de Heisenberg, o experimento de Einstein, Podolski e Rosen, o paradoxo

da caixa de Broglie, o paradoxo do gato de Schrödinger, e as diversas situações presentes na controvérsia Bohr-Einstein.

No âmbito da filosofia da ciência, os experimentos mentais passaram a ser objeto de interesses e investigações específicas, principalmente, no final do século passado, por volta da década de 1980 (Sorensen, 1992; 1998; Brown, 2004; Gooding, 1992; Norton, 2004; Hacking, 1992). Isso ocorre em um contexto no qual a própria concepção experimental na ciência passa a ser refletida social, cultural e epistemologicamente (Franklin, 1986; Steinle, 2002; Hacking, 2012; Raicik, Peduzzi e Angotti, 2018). Incitado pelas críticas dirigidas ao positivismo lógico, feitas por Popper, Kuhn, Hanson, Lakatos, Feyerabend, entre outros, o "novo experimentalismo" surge notadamente a partir dos estudos de Hacking (2012).

Os experimentos de pensamentos levantam várias questões relativas às suas funções em diferentes épocas e contextos, seus distintos tipos, as relações que estabelecem (ou não) com experimentos concretos. A própria definição desse tipo de experimento não é consensual e única, abarcando controvérsias que deixam o problema, ainda hoje, em aberto e objeto de pesquisa (Horowitz e Massey; 1991; Frappier, Meynell e Brown, 2013).

No âmbito do ensino de ciências, têm-se resgatado os experimentos de pensamento como um recurso didático ao ensino e aprendizagem de fenômenos, conceitos, e discussões *sobre* a ciência (Kiouranis, Souza e Santin Filho, 2010; Sampaio e Gomes, 2016; Helm e Gilbert, 1985). Um resgate histórico-epistemológico acerca dessa classe experimental pode, efetivamente, contribuir para reflexões mais proveitosas relativas à natureza da ciência; um dos objetivos da educação científica na atualidade. Afinal, "experimentos de pensamento mostram o valor essencial das conjecturas pré-observacionais, dos conhecimentos e das convicções teóricas do sujeito na investigação científica" (Peduzzi e Raicik, 2020, p. 27). Além disso, quando associado a metodologias didáticas específicas, permite contrastar as ideias prévias dos estudantes com aquelas a serem aprendidas.

Nesse artigo, discute-se os "*Gedankenexperimente*" nas perspectivas de Mach e de Kuhn, em particular, perpassando por entendimentos que mostram a atualidade, amplitude e proficiência do assunto. Através de um exemplo abordado por Einstein em seu livro *A teoria da relatividade especial e geral*, reflete-se sobre essa temática e suas potencialidades para o ensino das ciências naturais, da física em particular.

Sobre uma classe especial de experimentos: os *Gedankenexperimente* na perspectiva de Mach

Ao contrário de muitos dos sensacionalistas¹ que o precederam e dos positivistas que o sucederam, Mach não era nem indutivista e nem antiteórico em suas concepções epistemológicas, como ressaltam Price e Krinsky na introdução que fazem à tradução inglesa, *On thought experiments*, do artigo de Mach. De fato, na sua crítica ao espaço absoluto newtoniano, por exemplo, Mach introduz "uma suposição não testada, e talvez intestável", para explicar a curvatura da água na experiência do balde de Newton, atribuindo sua causa ao efeito gravitacional das estrelas. Segundo Price e Krinsky, "não existe ilustração mais clara da concepção

1 Sorensen (1998) considera Mach um sensacionalista extremo.

anti-indutivista de Mach e da sua ênfase sobre argumentos e conjecturas pré-observacionais, na investigação científica, do que seus escritos sobre experimentos de pensamento” (Price e Krimsky, 1972, p. 449).

Mach era um empirista estrito, mas também um proponente entusiasta dos experimentos mentais. Esses experimentos deveriam, em princípio, ser rejeitados pelos empiristas com argumentos semelhantes àqueles utilizados para negar proposições empíricas *a priori*. Mas Mach acredita que conhecimentos sintéticos *a posteriori* podem ser fornecidos pelos próprios experimentos mentais. “Embora os experimentos de pensamento não apelem diretamente à observação e à experimentação (e, portanto, pareçam *a priori*), eles são indiretamente baseados na observação e no experimento” (Sorensen, 1998, p. 55). Assim, os experimentos de pensamento são velhas experiências criativamente reorganizadas. Em vez de entrar em conflito com o empirismo, são uma extensão dele (Sorensen, 1991). As experiências passadas do mundo oferecem imagens não arbitrarias dos fatos (Brown e Fehige, 2019). Esse conhecimento, portanto, é apenas relativamente *a priori*; embora nenhuma nova observação concreta seja necessária, as antigas são. Há, assim, um conhecimento intuitivo na perspectiva de Mach, que pode parecer “mais sombrio”, pois sugere um conhecimento inato, negado ou descartado pelo empirismo (Sorensen, 1998).

De qualquer forma, os experimentos mentais funcionam (como atesta a própria história) e Mach argumenta que isso ocorre porque o pensamento humano é forçado, pela seleção evolutiva, a se conformar e se adaptar ao ambiente, garantindo uma semelhança entre mundo privado interno e o mundo público externo. Para ele, assim, “todo e qualquer conhecimento nada mais é do que um instrumento de adaptação da espécie humana ao ambiente” (Videira, 2009, p. 380).

Uma mente que se afasta muito da verdade é destruída pelas forças seletivas descritas por Darwin e, portanto, as mentes de todos os animais devem imitar os padrões da natureza. A pressão evolucionária do tipo ‘aprenda ou morra’ sobre a consciência nos dota de um tesouro de experiências acumuladas que ‘estão sempre à mão e das quais apenas uma pequena parte está incorporada em um pensamento articulado e claro’. Mach chamou esse tesouro de ‘conhecimento intuitivo’ (Sorensen, 1991, p. 253; grifo nosso).

No entanto, há uma significativa diferença, frisada na perspectiva machiana, entre simplesmente reorganizar mecanicamente os fatos passados (isto é, o conhecimento intuitivo) e, efetivamente, usar a mente de forma disciplinada. “As observações anteriores não devem ser compreendidas como se para Mach a ciência nada mais fosse do que mero refinamento do senso comum. A ciência era diferente do senso comum, na medida em que era abstrata e formalizada, sendo que essa segunda característica pressupunha [inclusive] o uso da matemática” (Videira, 2009, p. 379). Formular e lidar com um experimento mental é algo que difere do ato passivo de resgatar conhecimentos intuitivos. “Embora nada seja criado, algo ainda pode ser descoberto, porque reprocessamos experiências lembradas à luz de novos interesses e habilidades e à luz de informações e conceitos adquiridos mais recentemente” (Sorensen, 1991, p. 255). Nesse sentido, “a transformação das ideias aparece assim como uma parte da evolução geral da vida, como uma parte da sua adaptação a uma esfera de ação que constantemente se amplia” (Videira, 2009, p. 382).

Experimentos de pensamento, se não evitam, ao menos minimizam muitas fontes de erro. Eles podem dissipar variáveis supérfluas e estranhas (Kujundzic, 1995); “nosso senso bruto do

absurdo é uma pedra de toque da verdade porque elimina alternativas" (Sorensen, 1998). Para Mach, uma hipótese plausível, mas falsa, se revelaria em um experimento mental. A contradição, ou em outras palavras, aquilo que não pode ser conciliado com a experiência cotidiana, "frequentemente ilumina como uma chama no escuro, até mesmo as partes mais íntimas do entendimento", afirma ele (Sorensen, 1991, p. 251). Assim, "ao invés de prescrever o que deve acontecer, o conhecimento instintivo elimina o que não pode acontecer" (Sorensen, 1991, p. 253). Ademais, podem atenuar a interpretação subjetiva, uma vez que os estudiosos que desenvolvem experimentos desse tipo contam "com aquele imenso reservatório de experiências humanas passadas que necessariamente está de acordo com a natureza de alguma forma" (Kujundzic, 1995, p. 86-93). Eles também explicitam, com rara clareza, a importância dos conhecimentos e das convicções teóricas do investigador. Entretanto, os experimentos mentais, assim como os concretos, 'operando sob as mesmas regras', podem levar tanto ao conhecimento quanto ao erro; "deste último, apenas um exame repetido e exaustivo pode nos proteger" (Mach, 1976, p. 90).

Conforme Mach:

Nossas ideias estão mais fácil e prontamente à nossa disposição do que fatos físicos. Experimentamos com o pensamento, por assim dizer, com pouco custo. Então, não devemos nos surpreender que, frequentemente, os experimentos de pensamento precedam os experimentos físicos, e que até os preparem (Mach, 1972, p. 452).

Os resultados de certos experimentos de pensamento podem ser tão convincentes que a sua realização, em condições reais, é inteiramente dispensável podendo ser conduzidos apenas na imaginação. Mas, para Mach, 'dar asas à imaginação' era limitá-la à pressão experiencial; ela precisa ser "lapidada e moldada para se ajustar aos contornos da observação e do experimento. Só está em forma quando moldada; e quanto mais modelada, melhor" (Sorensen, 1998, p. 59). Assim, quanto mais incertas ou indefinidas forem as conclusões, maior será a necessidade da implementação do experimento em situação concreta, para dissipar incompreensões, dúvidas, divergências. De fato, as experiências de Galileu com o plano inclinado testam, e corroboram, uma convicção – a de que a aceleração de um corpo em queda livre é constante. Não obstante, elas também cumprem o necessário e indispensável papel de mostrar aos defensores do paradigma aristotélico, no âmbito de uma ciência com novos valores, que as suas concepções sobre a queda dos corpos são insatisfatórias.

Sob muitos aspectos, um experimento físico é uma continuação natural de um experimento pensado, como diz Mach. No âmbito das relações entre calor e temperatura, os experimentos realizados por Joseph Black (1728-1799), com o uso de termômetros, que o levam a formulação da lei zero da termodinâmica e a estabelecer que a quantidade de calor cedido a um corpo durante uma mudança de fase não varia a sua temperatura, ratificam, em termos quantitativos, o que o trabalho teórico já antecipara. A existência do equivalente mecânico do calor, prevista teoricamente por Julius Robert Mayer (1814-1878) e James Prescott Joule (1818-1889), tem sua corroboração experimental com os notáveis experimentos realizados por Joule ao longo de vários anos, que aperfeiçoam os valores numéricos encontrados nos primeiros experimentos. Também Mayer chega, através de experimentos, a valores congruentes com os encontrados por Joule (Martins, 1984).

Para Mach, o método de um experimento de pensamento é o mesmo que o de um experimento físico concreto: o método da variação. "Variando as circunstâncias (continuamente, se

possível), o intervalo de validade de uma ideia (expectativa) relacionada a essas circunstâncias aumenta. Através da modificação e especialização das circunstâncias, a ideia se desenvolve e se diferencia" (Mach, 1972, p. 453). Por certo, esse processo não é inerte e unilateral. Assim como as expectativas criam condições, essas por sua vez também podem criar novas ideias (Kujundzic, 1995).

O físico e filósofo austríaco ilustra essa concepção através de um exemplo. De um mau exemplo, na verdade, pois inadvertidamente banaliza uma árdua e extensa trajetória de esforços do intelecto humano. Uma pedra cai sobre a Terra, supõe ele. Ela continua a cair independentemente da altura em que se encontra, mesmo estando tão distante quanto a Lua. Como a queda de um objeto não depende de seu tamanho, pode-se conceber a pedra com o tamanho da Lua. Portanto, a Lua cai em direção a Terra, como qualquer outro objeto. Mas essa atração não pode ser uma prerrogativa apenas da Terra. A atração entre dois corpos de um sistema é recíproca. "A Lua e a Terra consistem de pedras. Pelo efeito recíproco das massas, cada parte atrai qualquer outra parte. A Lua e a Terra não são essencialmente diferentes de outros corpos celestes. A gravitação é universal" (Mach, 1972, p. 453).

Mach chama a atenção para o valor da conjectura antes da realização de um experimento. A conjectura que antecipa resultados não é metodologicamente anticientífica. Ao contrário, ela é parte de um processo natural no delineamento e execução de um experimento físico. "Antes de Galileu investigar a queda dos corpos, ele teorizou. Compreendeu, apenas através da reflexão, que a velocidade aumentava" (Mach, 1972, p. 455). Foi somente depois que ele testou essa hipótese por meio da experimentação. Com efeito, alguns experimentos de pensamento podem implicar em uma modificação de crença, de visão de mundo, e mostrar desta forma uma de suas contribuições para o progresso científico (Brown e Fehige, 2019).

Cabe destacar, como o faz Mach (1976, p. 89), que "não é aconselhável considerar um único experimento ou observação isoladamente" como suficiente para a confirmação de uma visão; isso tanto para experimentos concretos quanto para experimentos mentais. Retomando o método da variação por ele evocado, faz-se necessário, "tanto quanto possível, variar as condições, tanto aquelas consideradas importantes como as que parecem indiferentes; e isso com os próprios experimentos assim como com os de outras pessoas" (Mach, 1976, p. 89-90).

Ele igualmente enfatiza que conjecturas que antecipam o resultado de um experimento têm grande valor didático. Na perspectiva machiana, não apenas o estudante, mas também o professor pode beneficiar-se desse método de conjecturar ou, melhor dizendo, dessa estratégia de ensino. "Por esse método, mais do que por qualquer outro", afirma ele, "o professor fica melhor familiarizado com [os conhecimentos de] seus estudantes" (Mach, 1972, p. 455). Sabendo o que pensam, conhecendo as suas ideias prévias, ele pode auxiliar para corrigir equívocos, assim como valorizar e enaltecer as contribuições relevantes. O exercício de conjecturar propicia um melhor desenvolvimento do processo de formulação de expectativas, algo inevitável. "A questão para Mach não era se deveríamos fazer experimentos mentais: não temos escolha. A questão era como fazer o que devemos fazer, satisfatoriamente" (Sorensen, 1998, p. 63). Ademais, a dinâmica de imaginação e criatividade atenua a lacuna entre as humanidades e a educação científica (Matthews, 1988).

Mach (1972) ainda ressalta que experimentar com o pensamento é extremamente importante para o desenvolvimento cognitivo, sugerindo o uso de paradoxos como uma forma de incentivar esse hábito. Segundo ele, aprende-se a perceber melhor a natureza de um problema

através de um paradoxo. Os seus elementos conflitantes estimulam o exercício do pensamento, evitando a sua inércia. Envolvem, enfim, o indivíduo em um processo que pode ser chamado de experimento de pensamento.

Em síntese, Mach “se propôs a reconciliar os experimentos mentais com o empirismo. Por meio da evolução darwiniana, visou explicar elegantemente como os padrões mentais passam a refletir aqueles naturais” (Sorensen, 1991, p. 263).

Ponderações às considerações de Mach

O filósofo contemporâneo Roy Sorensen, em *Thought experiments* (1998), salienta que Mach sistematizou tão bem reflexões acerca dos experimentos de pensamento que é possível registrar inúmeros pontos de convergência entre sua concepção e uma perspectiva contemporânea do assunto. A familiaridade como um fator-chave da experiência de pensamento é um deles. Ele destaca o entendimento machiano de que, quanto maior for a familiaridade de uma situação, melhor poderá ser o julgamento sobre ela e de que hipóteses exploram (e dialogam com) conhecimentos instintivos. Mas, como enfatiza, familiaridade não é o mesmo que realidade e deve ser vista com parcimônia; “podemos não estar familiarizados com coisas reais (radiação, mar profundo, núcleo do sol) e familiarizados com coisas irreais (Papai Noel, números da sorte, curas milagrosas)” (Sorensen, 1998, p. 66-67).

Apesar de a própria concepção de Sorensen acerca dessa classe de experimentos estar embebida “um pouco no espírito” machiano (Brown e Fehige, 2019), ele apresenta alguns aspectos divergentes entre as suas ideias e as de Mach, que ampliam a discussão e a reflexão sobre o tema na atualidade.

Uma das objeções de Sorensen (1998) refere-se à subjetividade envolvida na perspectiva machiana – superestimada de seu ponto de vista –, acerca das proposições fornecidas pelos experimentos mentais. “Mach torna o estágio inicial do experimento mental incorrigível e subjetivo demais” (Sorensen, 1998, p. 68). Apesar de Mach considerar que os conhecimentos advindos desses experimentos seriam conhecimentos a *posteriori*, eles abarcariam um suposto relativismo, uma vez que “todo mundo tem sua própria realidade interior” (Sorensen, 1998, p. 68).

A ideia de que o pensamento, devido a sua origem e estrutura, seria “nada mais do que uma sombra duradoura da natureza” (Kujundzic, 1995, p. 86), torna-se passível de uma crítica mais contundente, portanto. Em certo sentido, “em vez de anunciar o que deve acontecer, o conhecimento instintivo [pode] rejeita[r] bruta e simplesmente o que não pode acontecer” (Sorensen, 1998, p. 52), posto que elimina alternativas. Isso, no entanto, pode servir tanto positivamente quanto incorretamente. “É aqui que o aspecto heurístico do tratamento de Mach aos experimentos mentais entra em jogo” (Kujundzic, 1995, p. 88). Por isso a ressalva de Sorensen em admitir, pura e simplesmente, que os experimentos mentais podem converter e tornar explícitos conhecimentos instintivos; o papel dos experimentos mentais a esse respeito seria melhor descrito como uma espécie de “filtragem” de ideias (Kujundzic, 1995).

Sendo que para Mach os experimentos mentais envolvem imagens não arbitrarias de fatos, adquiridas em experiências anteriores no mundo (Brown e Fehige, 2019), cabe lembrar que, quando eles não são tão convincentes, além de utilizar o método de variação no âmbito do pensamento, é preciso conduzir uma experiência concreta valendo-se do mesmo método. É

nesse sentido que Sorensen (1998, p. 68) admite que a perspectiva machiana “só pode permitir que o experimentador de pensamento erre no estágio em que infere fatos sobre a realidade externa a partir da interna”. De qualquer modo, Mach afirma positivamente que “o conhecimento e o erro fluem das mesmas fontes mentais; apenas o sucesso pode distinguir um do outro. Um erro claramente reconhecido, por meio de uma correção, pode beneficiar o conhecimento da mesma forma que um conhecimento positivo” (Mach, 1976, p. 84).

Essa crítica traz à tona a própria compreensão de experimento mental. Como explicita Kujundzic (1995), enquanto Mach estende suas considerações, sobretudo, às ideias inatas ou pré-concebidas, deixa vaga e limitada a aplicabilidade de sua concepção – no que se refere, por exemplo, a teorias éticas. “O que acontece não apenas com os experimentos mentais éticos, mas também com a fantasia, o sonho, a meditação, a narração de histórias e a alucinação? [...] Aqui, o princípio de pensamento de Mach em conformidade com a natureza torna-se altamente questionável” (Kujundzic, 1995, p. 89). Para o autor, a fim de salvaguardar a sua concepção “Mach teria que proibir experimentos mentais não científicos de sua teoria, ou admitir que há muitos fenômenos na história intelectual humana que não resultaram da solução prática de problemas” (Kujundzic, 1995, p. 89-90).

Outro aspecto passível de divergência na concepção de Mach, mencionado por Sorensen (1998), diz respeito à ideia de que experimentos concretos são sempre precedidos por experimentos mentais. Essa condição só seria satisfeita, continuamente, caso o conceito de experimento de pensamento fosse tão amplo que abarcasse qualquer previsão ou ideia. Nesse sentido, torna-se relevante uma distinção, embora não necessariamente dicotômica, entre “um experimento de pensamento” e “um experimento que é planejado e executado no pensamento” (Kujundzic, 1995, p. 90).

De acordo com Sorensen, essa amplitude (distorcida) no entendimento sobre experimentos de pensamento não deixa de estar ligada à ideia de experiência como serva da teoria; que seria a relevância (hierárquica) da teoria sobre o experimento, conferida por muitos filósofos (Gooding, 2000). Aqueles adeptos e crentes da funcionalidade dos experimentos mentais desejariam, nesse sentido, evidenciar aos experimentadores “concretos” que eles estão do mesmo lado. Mas essa trivialidade tem suas consequências, inclusive e principalmente, aos que não atribuem relevância aos experimentos desse tipo.

O cético sobre os experimentos mentais prontamente admite o valor de planejar os próprios experimentos. Mas ele não pode ser aplacado, simplesmente, redescrivendo o planejamento como um experimento mental [...]. No máximo, o experimento mental é uma técnica usada no planejamento de um experimento, não o planejamento em si (Sorensen, 1998, p. 75).

Reside aqui, também, a importância de discutir não apenas o que se pode entender por experimentos mentais, mas as suas funções e sua aplicabilidade (ou não) em distintas áreas. Nessa perspectiva, e retomando um ponto supracitado por Kujundzic (1995), Sorensen admite que Mach transitou pelas ciências naturais – e ofereceu poucos exemplos – deixando de abarcar discussões e aplicabilidade desses experimentos na ética, lógica e matemática, por exemplo.

De qualquer forma, experimentos de pensamento parecem “abrir um portal encantado”, nas palavras de Sorensen, que pode levar a caminhos luminosos ou sombrios. Ostentando uma sensação de “clarividência [...], provoca a admiração em alguns e a suspeita em outros. Mas a

maravilha do experimento mental é apenas um caso especial de nossa vaga perplexidade sobre como uma pergunta poderia ser respondida apenas pensando" (Sorensen, 1998, p. 76).

Uma função para as experiências mentais: considerações kuhnianas

No ensaio publicado em 1964, "Uma função para as experiências mentais", Kuhn (2011, p. 257) discorre sobre uma classe de experimentos que, em suas palavras, "cumpriram [e cumprem] um papel crucial no desenvolvimento das ciências físicas" – os experimentos de pensamento. Ele salienta, no entanto, que reflexões sobre a função desses experimentos geram distintas questões, uma delas, a título de exemplo, envolve o chamado "paradoxo de experimentos mentais":

Assumindo que todo experimento mental bem-sucedido inclui em seu esboço alguma informação prévia sobre o mundo, essa informação não está em questão no experimento. Reciprocamente, se estivéssemos lidando com um experimento mental real, os dados empíricos sobre os quais ele se baseia seriam bem conhecidos e amplamente aceitos antes de o próprio experimento ser ao menos concebido. Como então, baseado exclusivamente em dados familiares, um experimento mental é capaz de conduzir a novos conhecimentos ou a uma nova compreensão da natureza? (Kuhn, 2011, p. 258).

O filósofo afirma que respostas iniciais, e aparentemente "simples", sobre essa e outras questões poderiam ser formuladas; uma delas indica que a partir de um experimento mental, a nova compreensão que surge "não é uma compreensão da *natureza*, e sim do *aparato conceitual* do cientista" (Kuhn, 2011, p. 259). Nesse caso, o experimento de pensamento iria contribuir para dissipar uma confusão prévia no então aparato conceitual do estudioso. Como frisa Dyck (2003), sua função seria a de trazer à tona a inconsistência de alguns conceitos. Uma vez que o conhecimento adquirido não recairia sobre a própria natureza, mas ao/no arcabouço conceitual, o paradoxo desapareceria. Não obstante, embora importante, essa resposta não é totalmente correta; é "ilusório descrever a situação do cientista, antes da execução do experimento mental pertinente", pura e simplesmente, destaca Kuhn (2011, p. 259), "como 'contraditória em si mesma' ou 'confusa'".

Kuhn discute essa, e outras questões, analisando tanto estudos desenvolvidos com crianças por Jean Piaget quanto, e principalmente, com um experimento histórico desenvolvido por Galileu na Primeira Jornada do *Diálogo*, envolvendo o movimento de corpos em um plano inclinado.² Mas como o físico, historiador e filósofo reconhece, não é possível, tampouco desejável, sintetizar com um único exemplo (histórico-científico, no caso) uma categoria que envolve distintos tipos de experimentos mentais, como a história atesta.

A visão tradicional de que os experimentos de pensamento não ensinam nada sobre o mundo, pois se baseiam somente em dados bem conhecidos, é, portanto, reconhecida, mas

2 "Lembro-me nitidamente de como essa influência [de Piaget] se fez notar em meu primeiro encontro com Alexandre Koyré, aquele que, mais do que qualquer outro historiador, tem sido meu *maître*. Disse a ele que foi com as crianças de Piaget que aprendi a compreender a física de Aristóteles. Sua resposta – a física de Aristóteles o ensinou a compreender as crianças de Piaget – apenas confirmou a impressão que eu tinha da importância daquilo que eu havia aprendido" (Kuhn, 2011, p. 45-46).

criticada por Kuhn. Para que um experimento de pensamento seja eficaz, ele deve empregar conceitos da maneira como são utilizados corriqueiramente, mas isso não implica negligenciar, necessariamente, o que “a maioria das pessoas aprende junto sobre seus conceitos e sobre o mundo” (Kuhn, 2011, p. 270). É infrutífero limitar o papel dos experimentos de pensamento como o de desemaranhar um conjunto de conceitos que são compatíveis em situações familiares aos quais foram aplicados, mas que apresentam conflitos na situação construída mentalmente (Rouse, 1998).

Efetivamente, “os experimentos mentais revelam inconsistências ocultas, chamando nossa atenção a cenários imaginários que ativam um conflito nos critérios que regem o conceito” (Sorensen, 1998, p. 115). Portanto, a concepção mais comumente difundida de que, a partir de experimentos mentais, estudiosos são colocados diante de contradições e disso resultam novos conceitos que substituem os antigos, considerados então “confusos”, precisa ser vista com parcimônia.

Os conceitos ‘corrigidos’ na sequência de um experimento mental não apresentavam nenhuma confusão intrínseca. Se sua utilização apresentou problemas para o cientista, esses problemas [...] surgem não de seu equipamento mental tomado de forma isolada, mas de dificuldades descobertas na tentativa de ajustar esse equipamento a experiências anteriormente não assimiladas. A natureza, e não a lógica por si só, era responsável pela confusão aparente (Kuhn, 2011, p. 278).

É nesse sentido que Kuhn estabelece uma analogia entre os papéis de experimentos mentais e aqueles desempenhados pelas observações e experimentos concretos. Ou seja, os experimentos de pensamento tanto podem: a) evidenciar que há um conjunto de expectativas previamente assumidas que não está em conformidade com a natureza e, portanto, essa relação necessita ser melhor assimilada; quanto: b) sugerir e ensinar, então, os modos específicos pelos quais tanto as expectativas quanto as teorias, conceitos etc., devem ser revisados (Dyck, 2003). “Mas como”, indaga Kuhn (2011, p. 278), “os experimentos mentais podem fazer isso?”.

No âmbito da filosofia kuhniana, em um período de ciência normal, as generalizações simbólicas, os modelos, os valores e os exemplares de um corpo de conhecimento orientam o estudioso em seu trabalho, definindo os problemas que exigem atenção e os critérios, tácitos ou não, para o julgamento das soluções apresentadas (Peduzzi; 2011; Raicik e Gonçalves, no prelo). Na rotina do desenvolvimento do paradigma, alguns problemas resistem à solução. A existência de anomalias significativas no edifício teórico e experimental pressiona a comunidade à procura de uma nova abordagem. Entrementes, alguns padrões de investigação da comunidade, ou de parte dela, podem mudar gradualmente; quer nas concepções da área de estudo e seus objetivos, ou ainda, nas metodologias utilizadas, quer nos valores empregados pela comunidade.

Assim, a experiência de pensamento pode ser um recurso analítico importante para gerar ou induzir crises conceituais, nos mais diversos níveis ou graus. A crise traz para o centro das atenções problemas sem solução, expectativas teóricas e experimentais frustradas. A conscientização da dificuldade é condição necessária para reformulações que com frequência demandam novos conhecimentos – novas alternativas teóricas – por vezes revolucionários. “O resultado dos experimentos mentais pode ser o mesmo da revolução científica: permitir ao cientista utilizar como parte integrante de seu conhecimento aquilo que seu próprio conhecimento lhe tornara

inacessível. É nesse sentido que ele muda seu conhecimento [inclusive] do mundo" (Kuhn, 2011, p. 281). Ainda que não se tenham novos dados empíricos propriamente ditos, experimentos mentais podem ensinar algo novo sobre o mundo; permitindo que seja reconceituado de uma nova maneira (Brow e Fehige, 2019).

Embora Kuhn não tenha se debruçado em demasia sobre os experimentos de pensamento, suas considerações são de suma relevância, sobretudo pela máxima que traz de que um de seus papéis é o de permitir um aprendizado não só acerca de conceitos, mas sobre o mundo; conseqüentemente, expandindo nossa visão de ciência (Forge, 1991). Butković (2007) salienta que a ideia kuhniana de que com experimentos de pensamento aprende-se sobre os conceitos e o mundo abarca, pelo menos, duas interpretações: i) este processo ocorre simultaneamente; ii) este processo não indica (e não precisa indicar) supremacia ou precedência de uma aprendizagem sobre a outra. Ademais, suas ponderações auxiliam a entender o porquê desses experimentos difundirem-se em períodos de crise e, subseqüentemente, em momentos de revoluções científicas (Horowitz e Massey, 1991).

Hacking (1992) comenta que, diferentemente de Mach – que parece não ter atribuído ou reconhecido algum problema nos experimentos mentais – Kuhn debruça-se sobre o paradoxo supracitado, que se tornou um clássico. As ponderações kuhnianas deixam "uma marca permanente" acerca dessa temática, pois "trazem à tona, de forma sucinta, uma tensão conceitual [não apenas uma mera confusão] entre duas formas de pensar e nos forçam a enfrentá-la" (Hacking, 1992, p. 304).

Experimentos mentais: colocando em evidência alguns estudos das últimas décadas

Em *Estudos de história do pensamento científico*, publicado em 1973, Koyré sinaliza a proficiência das experiências mentais para o desenvolvimento da ciência (e da física, em particular):

As experiências reais são, frequentemente, de difícil realização, pois implicam, não menos frequentemente, a necessidade de uma complexa e custosa aparelhagem. Além disso comportam, necessariamente, certo grau de imprecisão e, portanto, de incerteza [...]. A perfeição não pertence a este mundo. Certamente, pode-se aproximar dela, mas não se pode atingi-la. Entre o dado empírico e o objeto teórico existe, e sempre existirá, uma distância que é impossível vencer [...]. É aí que a imaginação entra em cena, eliminando facilmente o abismo. Ela não se embaraça nas limitações que nos são impostas pelo real. Ela 'realiza' o ideal e até o impossível. Opera com objetos teoricamente perfeitos, e são tais objetos que a experiência imaginária põe em jogo [...]. Assim, a imaginação obtém resultados de uma precisão total – o que, aliás, não os impede, às vezes, de serem falsos, pelo menos em relação à *rerum natura* – e é certamente por isso que, tantas vezes, são experiências imaginárias que estão subentendidas nas leis fundamentais dos grandes sistemas de filosofia natural, como os de Descartes, de Newton, de Einstein... e também de Galileu (Koyré, 1982, p. 209).

Por certo, o interesse mais acentuado nas últimas décadas pelos experimentos mentais – por filósofos, historiadores, estudiosos – envolve muitos dos pontos e encadeamentos destacados pela síntese de Koyré, e outros tantos mais. Afinal, esses experimentos podem ser empregados

com distintos propósitos, que envolvem tanto entretenimento tão somente, quanto potencialidades educacionais, análise conceitual, reconhecimento da relevância das hipóteses na ciência, a importância da imaginação, sua interlocução com teses realistas, entendimento do desenvolvimento científico em si etc. (Brown e Fehige, 2019). Por que confiar em experimentos mentais? Como os experimentos realizados apenas na mente podem ensinar algo sobre a realidade e o que exatamente eles ensinam? Como eles realmente funcionam? (Brown, Meynell e Frappier, 2013).

A partir de teses como as de Koyré, Mach e Kuhn, em especial, surgiram (e surgem) novas maneiras de compreender os experimentos mentais e suas implicações. Diversas obras e trabalhos, alguns citados a seguir, demonstram a riqueza do tema e as implicações e reflexões que suscitam em distintos campos.

O livro *Thought experiments in science and philosophy*, organizado por Tamara Horowitz e Gerald J. Massey (1991), em decorrência da conferência "*The place of thought experiments in science and philosophy*", realizada em Pittsburgh em 1986, é dividido em quatro partes que evidenciam o alcance e a importância desse instrumento de investigação científica e filosófica. Inicialmente, discutem-se os experimentos de pensamento no âmbito da história e filosofia da ciência; depois as análises concentram-se nesse tipo de experimento na lógica e na matemática, seguidas de um conjunto de artigos que visam analisar os experimentos mentais nas ciências e, por fim, na filosofia.

No livro supracitado de Sorensen, *Thought experiments*, publicado em 1992, o autor estuda e analisa os experimentos de pensamento estabelecendo generalizações acerca deles que transcendem a física (mas a incluem), e também as funções dos experimentos mentais filosóficos. Como aponta na introdução, nos anos que antecederam à publicação de seu trabalho, sobretudo na década de 1980, a experimentação passou a ser objeto de análise mais pormenorizada em termos epistemológicos, históricos, sociais, culturais, com o "novo experimentalismo". "A simpatia por esse movimento, aliada à crença de que experimentos mentais são experimentos, levou-me a suspeitar de uma simplificação excessiva correspondente ao papel do experimentador mental" (Sorensen, 1998, p. 3). No percurso que traça, ele tece considerações tanto sobre Mach quanto sobre Kuhn. Além disso, Sorensen (1998) defende que o experimento de pensamento é, antes de tudo, um experimento e precisa ser visto como um, embora com certos limites em relação àqueles concretos. "Se os experimentos mentais são surpreendentemente semelhantes aos experimentos [concretos], então os experimentos [concretos] são surpreendentemente semelhantes aos experimentos mentais" (Sorensen, 1998, p. 3).

A obra *Thought experiment: on the powers and limits of imaginary cases* de Tamar Gendler, publicada em 2000, enfatiza que os experimentos de pensamento são empregados em campos distintos, como a física, o direito, a filosofia. Em síntese, tanto as potencialidades quanto os limites dessa classe experimental estão relacionados às mudanças das estruturas conceituais. As experiências de pensamento envolvem, em sua perspectiva, "um processo de raciocínio realizado no contexto de um cenário imaginário bem articulado para responder a uma questão específica sobre uma situação não imaginária".

Os seminários "*Science without data: the role of thought experiments in empirical investigations*" que ocorreram em 2010, resultaram na obra *Thought experiments in philosophy, science, and the arts*, editada por Mélanie Frappier, Letitia Meynell e James Brown (2013). Logo na introdução, os editores destacam que "não há consenso sobre o poder epistêmico dos experimentos mentais, seu caráter lógico, a natureza de seu conteúdo ou os domínios apropriados

de sua aplicação" (Brown, Meynell e Frappier, 2013, p. 1). Isto, por certo, traz à tona distintas reflexões sobre essa classe de experimentos, sobretudo seu caráter e seu valor epistemológico, que perpassam pelos papéis da imaginação, da idealização, da sua visualização. Além disso, como evidenciam artigos subsequentes, embora essas discussões sejam igualmente relevantes, é inegável que a história, notadamente a histórica da física, traz inúmeros exemplos deles.

Com efeito, teses como a de Sorensen surgem como uma alternativa menos radical ao debate Brown-Norton, por exemplo (Gooding, 1992; Hacking, 1992; Hitchcock, 2004). James Brown (1986; 1991; 2004; 2013) argumenta que os experimentos de pensamento fornecem um contraexemplo ao empirismo, uma vez que esses experimentos propõem um novo conhecimento do mundo, ainda que não envolvam novas observações. Eles são, grosseiramente falando, "dispositivos da imaginação utilizados para investigar a natureza das coisas" (Brown e Fehige, 2019). John Norton (1991; 2004; 2013), em contrapartida, afirma que os experimentos mentais são apenas apelos argumentativos. Caso se pergunte: "onde os experimentos mentais estão localizados na escala entre teoria e experimento?" (Stöltzner, 2003, p. 244), Norton diria que mais próximos da teoria ou de sua análise argumentativa. Hacking (1992) salienta que outras perspectivas, como as de Nancy Nersessian e David Gooding, embora diferentes entre si, e inclusive distintas da noção de Brown, têm em comum a concepção antinortoniana.

Em síntese, e apesar das distintas perspectivas em torno dessa temática tão instigante, complexa e profícua, pode-se dizer que experimentos de pensamento mostram o valor essencial das conjecturas pré-observacionais, dos conhecimentos e das convicções teóricas do sujeito na investigação científica (Peduzzi e Raicik, 2020). Ademais, "exceto por serem realizados na mente, os experimentos mentais são tentadoramente semelhantes a experimentos reais. Quanto semelhante, está aberto ao debate" (Brown, Meynell e Frappier, 2013, p. 1).

A relatividade da simultaneidade no artigo de Einstein "Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento"

Em 1905, Albert Einstein (1879-1955) publica o artigo "Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento", no qual apresenta a teoria da relatividade restrita. Já na introdução, ele postula os princípios dessa teoria, depois de criticar o conceito de referencial privilegiado na física. De fato, exemplos como o da interação eletrodinâmica entre um ímã e um condutor – que mostram que os fenômenos observados dependem apenas do movimento relativo entre ambos – assim como o insucesso das experiências feitas para detectar o movimento da Terra em relação ao meio luminífero, "levam à conjectura de que não apenas os fenômenos da mecânica, mas também os da eletrodinâmica não têm propriedades que correspondam ao conceito de repouso absoluto" (Einstein, 2001, p. 143). Assim, Einstein sustenta que em todos os referenciais em que são válidas as leis da mecânica também valem as leis da eletrodinâmica e da óptica, elevando essa conjectura (que ele chama de princípio da relatividade) à condição de um postulado. Em seguida, introduz o postulado da constância da velocidade da luz, que só aparentemente se mostra incompatível com o princípio da relatividade. Nesses termos, o éter luminífero se torna supérfluo.

Na primeira seção do artigo, Einstein apresenta sua definição de simultaneidade. No âmbito da cinemática, a descrição de um movimento exige, a cada instante, o conhecimento de suas

coordenadas espaciais (em relação a um corpo ou a um sistema de referência) e temporais. Voltando-se especificamente para o tempo, ele ressalta que a medida dessa grandeza física envolve sempre apreciações sobre “acontecimentos simultâneos”, como o da chegada de um trem a uma estação e o registro desse evento pela posição dos ponteiros de um relógio.

Para evitar ambiguidades ou incoerências na sua teoria, Einstein diz que esse conceito de simultaneidade é satisfatório para tratar situações que envolvem eventos muito próximos um do outro (nos quais não é preciso levar em conta o valor finito da velocidade de propagação da luz). Desse modo:

Se há um relógio em um ponto A no espaço, então um observador localizado em A pode calcular o tempo dos eventos nas vizinhanças imediatas de A, encontrando as posições dos ponteiros do relógio que são simultâneas a esses eventos. Se houver, em um ponto B, um relógio que, sob todos os aspectos, assemelha-se ao relógio em A, então, o instante da ocorrência dos eventos na vizinhança imediata de B pode ser medido por um observador em B (Einstein, 2001, p. 146).

Para comparar o instante de ocorrência de um evento em A com o instante de ocorrência de um evento em B, os relógios em A e em B devem estar sincronizados. Considerando, então, dois relógios em repouso relativo nos pontos A e B de um sistema de referência inercial, e assumindo implicitamente a propagação da luz em um espaço homogêneo e isotrópico (Ron, 1985), Einstein define operacionalmente a sincronização desses relógios, estabelecendo que o tempo que a luz leva para ir de A até B é o mesmo que a luz leva para ir de B até A:

Pois suponha-se que um raio de luz que parta de A para B, no instante de tempo A de t_A , seja refletido de B para A, no instante de tempo B de t_B e chegue de volta a A no instante de tempo A de t'_A . Os dois relógios estarão sincronizados, por definição, se $t_B - t_A = t'_A - t'_B$ (Einstein, 2001, p. 146).

Por conseguinte, tem-se que: $t_B = \frac{t_A + t'_A}{2}$.

Depois de estabelecer “por meio de certos experimentos físicos (imaginados)”,³ diz Einstein (2001, p. 147), o que se deve entender por relógios sincronizados em repouso, em diferentes pontos de um referencial inercial, ele aborda a relatividade de comprimentos e tempos na seção seguinte. Nela ele mostra que não se pode atribuir à simultaneidade o caráter absoluto que essa grandeza tem na física newtoniana. O princípio da relatividade e o princípio da constância da velocidade da luz subsidiam as discussões. Cabe ressaltar que a consideração einsteiniana acerca dos experimentos mentais ou, em suas palavras, imaginados, neste momento, permite que se chegue às definições de “sincronizado” e de “instante de tempo”.

Por certo, a relatividade da simultaneidade é induzida por um experimento de pensamento que vai sendo variado circunstancialmente de modo que, inicialmente, envolvem medidas do comprimento de uma haste rígida, tanto quando ela se encontra em repouso como quando em movimento uniforme, em um referencial inercial (que Einstein chama de “sistema em repouso”); e que depois resultam em medidas de tempo.

3 No artigo original em alemão (e de acesso livre no *Annalen der Physik*, disponível em: doi.org/10.1002/andp.19053221004), Einstein (1905, p. 894) usa o termo “*gedachter physikalischer Erfahrungen*”.

Assim, em um primeiro momento de sua experiência mental, Einstein dispõe a haste em repouso ao longo do eixo X do sistema de coordenadas. Nessa condição, um observador, também em repouso e munido de uma régua, mede o seu comprimento atribuindo-lhe o valor l .

A seguir, modificando a situação inicial, ele supõe que a haste se movimenta na direção X do sistema de coordenadas, com velocidade (de módulo) constante v . Um observador, que se desloca juntamente com a haste, mede o seu comprimento. Nesse caso, a situação é idêntica a que ocorre na circunstância anterior, na qual a haste e o observador com a sua régua estão em repouso relativo. Desse modo, ele atribui à régua um comprimento l (que Einstein denomina de comprimento da haste em repouso).

Em um novo processo de modificação e especialização, a haste também se movimenta na direção X, com velocidade (de módulo) constante v . Mas agora o seu comprimento é medido por um observador situado em repouso no sistema de coordenadas da experiência inicial (sistema em repouso). Usando relógios sincronizados e em repouso nesse sistema, o observador determina as coordenadas da origem e da extremidade da haste em um dado instante de tempo t . Nesse caso, conclui que o comprimento da haste (móvel) no sistema em repouso não é igual a l .

De acordo com a física clássica, a haste em repouso ou em movimento deveria apresentar o mesmo comprimento. A não invariância dos comprimentos no referencial einsteiniano tem implicações diretas sobre o tempo. À luz de uma perspectiva kuhniana, pode-se evidenciar a capacidade de experimentos mentais promoverem, em distintos níveis, crises conceituais.

Para encerrar a argumentação, Einstein apresenta uma última e conclusiva variação em sua experiência. Parte do comprimento r_{AB} atribuído a haste móvel pelo observador em repouso no processo anterior. Supondo, agora, que um raio de luz saia de A no instante t'_A , que se reflita em B no instante t_B e volte a A no instante t'_A , tendo em vista a constância da velocidade da luz (V), tem-se: $t_B - t'_A = \frac{r_{AB}}{V-v}$ e $t'_A + t_B = \frac{r_{AB}}{V+v}$.

"Vemos, assim", afirma Einstein (2001, p. 150), "que não podemos atribuir significado *absoluto* ao conceito de simultaneidade; ao contrário", continua sua conclusão, "dois eventos que são simultâneos, quando observados a partir de um sistema de coordenadas particular, não podem mais ser assim considerados quando observados a partir de um sistema que está em movimento em relação àquele sistema".

Com efeito, experimentos de pensamento, como ponderou Kuhn (2011), podem impulsionar conflitos nos critérios que regem alguns conceitos – inclusive aqueles que, normalmente, funcionam bem. Portanto, a aceitabilidade do conceito depende de fatos contingentes (Sorensen, 1998). Inevitavelmente, aprende-se sobre o conceito e sobre o mundo.

Em termos gerais, é possível sintetizar em dois aspectos a influência de Mach sobre este artigo einsteiniano:

primeiro, quando Einstein afirma que os problemas fundamentais da física não podem ser compreendidos sem uma análise epistemológica dos conceitos de espaço e tempo e, segundo, quando Einstein identifica a realidade com 'o que é dado pelas sensações, os 'eventos', ao invés de situar a realidade em um plano além ou por detrás da experiência sensorial' (Peduzzi, 2015b, p. 231).

Não obstante, como ressalta Holton (1995), embora Einstein tenha sido fortemente influenciado em sua juventude pela visão de ciência de Mach, ao longo de sua trajetória científica ele distancia-se do sensacionalismo e empirismo para aproximar-se do realismo racional.

A relatividade da simultaneidade em um livro de divulgação escrito por Einstein: uma pluralidade funcional para o experimento mental

Em 1916, Einstein escreve o livro *A teoria da relatividade especial e geral*, com o intuito de proporcionar uma noção da Teoria da Relatividade – da maneira mais clara, exata e simples possível – a leitores que “se interessam pela teoria mas não dominam o aparato matemático da física teórica” (Einstein, 1999, p. 7). O texto de divulgação pressupõe, como evidencia uma edição inglesa, de 1924, um nível de escolaridade correspondente ao de um exame de admissão à universidade ou, se poderia dizer, como faz a edição traduzida ao português (Einstein, 1999), uma instrução equivalente à do ensino médio.

Por certo, Einstein sabe das dificuldades de tratar em linguagem acessível, mas sem perda de rigor, um conhecimento especializado. Mas o fim justifica o esforço, como ele deixa claro no prefácio que escreve ao livro de divulgação de Lincoln Barnett, *O universo e o Dr. Einstein*, em 1948. É de suma importância, como mostra a atualidade, que as tentativas e os resultados da ciência sejam conhecidos pelas pessoas em geral; “Quando a ciência se restringe a um pequeno grupo” diz Einstein (1964, p. 7), “o espírito filosófico do povo decai, e ele caminha para a indigência espiritual”.

Na abordagem de seu livro, Einstein apresenta conceitos e ideias da teoria respeitando, de modo geral, a sequência e o contexto em que surgiram e, nesse percurso, explora consideravelmente o uso de experiências de pensamento. Essas experiências mentais que utiliza, e que cumprem um papel central na sua argumentação, diferem de certo modo daquelas empregadas no artigo de 1905; uma delas apresentada na seção anterior (Einstein, 2001). Procurando uma maior aproximação com o leitor de seu livro, Einstein se reporta a eventos cotidianos, como os que envolvem observadores dentro e fora de trens em movimento uniforme, em vez de argumentar em termos de situações mais abstratas ou formais, como ocorre no artigo. Nesse sentido, as experiências transcendem sua função no processo de construção do conhecimento científico em si, e passam a atuar, também, como fomentadoras da aprendizagem desse conhecimento, em outro nível. Além disso, essa sua preocupação permite um contraste, por exemplo, com o que discute Kuhn (2011), de que elas precisam ensejar o exercício de conceitos no referencial em que usualmente são utilizadas. Helm e Gilbert (1985) exploram isso, em uma das seções do artigo “*Thought experiments and physics education*”. Ao considerar experiências desse tipo, faz-se necessário atentar não apenas para o seu conteúdo específico, mas para a audiência a que visam, para os conhecimentos prévios que se espera que esses indivíduos possuam e para a função que o proponente da experiência almeja que ela tenha.

Destacando a importância do sistema de referência na especificação da trajetória de um corpo, Einstein inicia sua experiência de pensamento. Dessa forma, quando um observador situado na janela do vagão de um trem que se movimenta com velocidade constante deixa cair uma pedra sobre o leito da estrada (sem lhe dar qualquer impulso e abstraindo o efeito

da resistência do ar), ele constata que a pedra cai em linha reta. Já para um observador imóvel em um sistema de referência rigidamente ligado ao solo, a pedra executa um movimento parabólico. "Não existe uma trajetória em si, mas apenas uma trajetória em relação a um corpo de referência" (Einstein, 1999, p. 17) (ou sistema de coordenadas ou, ainda, sistema de referência, já que Einstein usa esses termos indistintamente, como sinônimos).

Naturalmente, o pleno conhecimento de uma trajetória pressupõe a especificação de como o móvel modifica a sua posição com o tempo. Para a leitura da variável tempo (que passa assim a ser uma grandeza observável), os observadores no trem e no solo empregam relógios "construídos de forma perfeitamente igual". Nas medidas que fazem, relevam a imprecisão "que é introduzida pelo fato de a velocidade de propagação da luz não ser infinita" (Einstein, 1999, p. 17).

Prosseguindo com o experimento do vagão, Einstein introduz o princípio da relatividade (no sentido restrito), pedindo a seu leitor que considere o movimento de um corvo que se desloca com velocidade constante em relação ao leito da estrada. Do ponto de vista de um observador que se encontra no trem em translação uniforme (em relação aos trilhos e, portanto, em relação à estrada), o corvo também se move com velocidade constante, embora o valor dessa velocidade seja diferente da que ele tem em relação ao solo. Em termos mais abstratos, como diz Einstein, se uma massa m apresenta um movimento retilíneo e uniforme em relação a um sistema de coordenadas galileano K (isto é, um sistema no qual é válida a lei da inércia), o seu movimento também será retilíneo e uniforme em um sistema de coordenadas K' , em translação uniforme em relação a K . E mais, os fenômenos da natureza que se desenrolam em relação a K' obedecem às mesmas leis que em relação a K .

Entretanto, a estruturação do eletromagnetismo maxwelliano mostrou que a mecânica não podia ser a base para a explicação de todos os fenômenos. Com isso, também se passou a questionar a validade do princípio da relatividade. A não equivalência física dos sistemas de coordenadas galileanos levava à noção de um sistema de referência privilegiado, K_0 , em "repouso absoluto". Nesse caso, qualquer outro sistema galileano, K , estaria "em movimento", e as leis expressas nesses referenciais seriam menos simples do que aquelas válidas em K_0 .

Dando continuidade ao experimento mental, em um processo de variação circunstancial do mesmo, o que na perspectiva machiana pode relacionar-se com o método da variação, Einstein examina a aparente incompatibilidade entre o princípio da relatividade e a lei da propagação da luz. Para isso, supõe que um raio de luz seja emitido com velocidade c por uma fonte em repouso sobre o leito da estrada, e que na mesma direção e sentido em que o raio se difunde, o trem se desloca sobre os trilhos com velocidade v . De acordo com a adição galileana de velocidades, o raio luminoso se propaga com a velocidade $c - v$ em relação ao trem. Mas isso está em contradição com o princípio da relatividade. Então, o que se deve fazer? Abandonar esse princípio ou preservá-lo e encontrar outra lei, mais complicada, ou fundamental, para a propagação da luz? Aqui entra em cena a teoria da relatividade especial, como ele diz. "Por uma análise dos conceitos físicos de tempo e de espaço, demonstrou-se que *não existe incompatibilidade entre o princípio da relatividade e a lei da propagação da luz*" (Einstein, 1999, p. 24).

Einstein então propõe a seu leitor que considere a queda de dois raios em pontos A e B da estrada, e que se avalie a simultaneidade desses eventos. Para a definição desse conceito, ele situa um observador no centro M da distância AB. Se, nessa condição, o observador detecta os dois raios no mesmo instante, os eventos são simultâneos. Ao se supor que a luz se move de A para M com a mesma velocidade (em módulo) que de B para M, não está se fazendo nenhuma

suposição sobre a natureza física da luz, como adverte Einstein. Ela envolve “uma *estipulação*” que se pode fazer “livremente para chegar a uma definição de simultaneidade” (Einstein, 1999, p. 26).

Assim, chegamos também a uma definição do ‘tempo’ na física. Imaginemos, com efeito, que coloquemos nos pontos A, B, C dos trilhos (que é aqui o sistema de coordenadas) relógios de igual construção e de tal modo acertados que as posições de seus ponteiros sejam simultaneamente as mesmas. Então entendemos por ‘tempo’ de um evento a indicação (posição dos ponteiros) daqueles relógios que estão na vizinhança (espacial) imediata do evento. Dessa maneira, a cada evento é atribuído um valor de tempo, que em princípio pode ser observado (Einstein, 1999, p. 26-27).

No referencial da física clássica, o traslado de relógios iguais e devidamente sincronizados para diferentes pontos de um sistema galileano não interfere no seu funcionamento. As coisas começam a mudar quando Einstein questiona o tempo absoluto da física newtoniana e, com ele, o caráter absoluto da simultaneidade. Esse experimento mental einsteiniano permite exemplificar a crítica de Kuhn à visão mais tradicionalista acerca dessa classe experimental. Embora se baseiem em dados conhecidos, isso não exige experimentos de pensamento de ensinarem algo novo sobre o mundo.

Eventos simultâneos para um observador em um sistema galileano K serão também simultâneos para um observador em um sistema K', em translação uniforme em relação a K? Por certo, à luz de uma perspectiva kuhniana, experimentos mentais podem relevar inconsistências ocultas que colocam em conflito conceitos e critérios que os regem. Através de um novo experimento de pensamento, Einstein responde a esta pergunta mostrando que não.

Na situação considerada por Einstein, um trem muito longo movimenta-se sobre os trilhos com velocidade (constante) v . Para as pessoas em seu interior, o trem é um bom referencial para a descrição de eventos. Outro possível referencial é o leito da estrada, onde se encontra um observador imóvel em M.⁴ Esse observador, a meia distância dos pontos A e B, constata que dois raios que incidem sobre esses pontos são eventos simultâneos. Os raios atingem A e B quando um observador no trem, situado em M', passa por M (Figura 1).



Figura 1

Figura 1: Esquema ilustrativo do experimento de pensamento de Einstein sobre a natureza da relatividade da simultaneidade de eventos (Fonte: Einstein, 1999).

Devido ao sentido do movimento do trem, M' se aproxima de B, afastando-se de A. Os sinais luminosos têm a mesma velocidade c para ambos os observadores, de acordo com o princípio da constância da velocidade da luz. Assim, o observador no trem detecta primeiro o raio luminoso proveniente de B (porque este percorre uma distância menor até ele), e depois o

4 Embora Einstein não faça menção explícita a esse observador, isso fica implícito no raciocínio que desenvolve.

que procede de A. Por conseguinte, esses dois eventos não são simultâneos para M'. De fato, se o trem se movimentasse com a velocidade da luz, o observador no trem diria que apenas um raio caiu sobre os trilhos.

Desse modo, conclui Einstein, medidas de tempo dependem do estado de movimento do corpo de referência. Destituindo-se o tempo do seu caráter absoluto, desaparece o conflito entre a lei da propagação da luz e o princípio da relatividade. Com efeito, e à luz de considerações kuhnianas, experimentos mentais podem expandir, ainda que implicitamente, a visão de ciência que se tem.

Chegamos a um importante resultado: eventos que são simultâneos em relação ao leito da estrada não são simultâneos em relação ao trem, e vice-versa (relatividade da simultaneidade). Cada corpo de referência (sistema de coordenadas) possui seu tempo próprio. Uma especificação temporal só faz sentido quando se indica o corpo de referência ao qual esta indicação se refere. Antes da Teoria da Relatividade, a física sempre admitia tacitamente que o significado das indicações de tempo era absoluto, isto é, que elas não dependiam do estado do movimento do corpo de referência. Mas acabamos de ver que esta suposição é incompatível com a definição tão natural de simultaneidade (Einstein, 1999, p. 28-29).

Os conceitos envolvidos no primeiro experimento abordado por Einstein, e os resultados que dele decorrem, não trazem qualquer novidade, ou dificuldade de compreensão, ao leitor familiarizado com a mecânica newtoniana, e com a noção de tempo como grandeza absoluta nessa teoria. Não obstante, eles são essenciais para preparar a ruptura com essa tradição, que vai ter curso com a sequência dos próximos experimentos. Mais uma vez, é possível estabelecer relações com ponderações de Kuhn; por certo, os estudiosos não são simplesmente colocados diante de contradições que revelam conceitos iniciais "confusos". O que pode acontecer é que algumas expectativas podem não estar em conformidade com a natureza, ao menos em casos específicos, que levam, por exemplo, a revisões de teorias e/ou conceitos.

Einstein dá o primeiro passo nesse sentido ao evidenciar a contradição, mas não uma mera "confusão", entre o princípio da relatividade newtoniano e o princípio da constância da velocidade da luz, no seguimento de seu experimento. A manutenção dos dois princípios, isto é, a indução de uma crise, transfere o problema para a adição galileana de velocidades que, ao se mostrar insuficiente, sugere mudanças no conceito clássico de tempo (e de espaço); consequentemente, levando a uma nova noção da natureza.

Paulatinamente, então, Einstein vai conduzindo o leitor à reformulação conceitual. Assim, em nova disposição experimental, ele define simultaneidade, chegando a uma definição operacional de tempo. Finalmente, com a análise da queda dos raios no leito da estrada por diferentes observadores inerciais, ele deixa claro que a especificação do tempo de ocorrência de um evento não é independente do referencial em que se encontra o observador – um resultado incompatível com o referencial newtoniano de seu leitor.

É possível, embora não seja fácil, explorar a insatisfação do leitor com o conceito de simultaneidade absoluta. Mas se essa é uma possibilidade que torna viável o cumprimento de funções explicitadas por Kuhn no experimento em que Einstein mostra as insuficiências desse conceito, certamente não se pode dizer, direta e simplesmente, o mesmo em relação ao último e conclusivo experimento.

A existência de subsunçores na estrutura cognitiva do indivíduo (i.e., um conhecimento especificamente relevante ou prévio em uma perspectiva ausubeliana) é condição necessária, mas não suficiente para a assimilação de novas ideias. Materiais potencialmente significativos podem ampliar significados, contribuindo para o processo de ressignificação de conceitos e enriquecimento dos subsunçores. Como ressalta Mach (1972), experimentos mentais contribuem para o desenvolvimento cognitivo. O livro de divulgação de Einstein cumpre um papel nesse sentido, visando um público mais amplo, em princípio.

Do desfecho de uma reflexão, algumas implicações...

Embora o tema dos experimentos mentais suscite inúmeros debates e esteja amplamente aberto à pesquisa, seu caráter instrutivo é inegável (Brown, Meynell e Frappier, 2013). Para além de sua importância ao próprio desenvolvimento do conhecimento científico, as experiências de pensamento têm um notável valor pedagógico.

Mach foi um dos raros e primeiros físico-filósofos a se preocupar com o ensino de ciências e apontar a proficuidade desses experimentos nesse sentido, inclusive (Matthews, 1998; Mach 1895). Os experimentos mentais tornam-se relevantes não apenas para os estudantes, mas também para os professores. Este recurso pode permitir, por exemplo, que docentes avaliem as concepções prévias dos discentes e as contrastem com um novo conhecimento a ser aprendido. Estabelecendo uma analogia com princípios da aprendizagem significativa de David Ausubel (1918-2008), pode-se dizer que o uso de determinados experimentos mentais pode contribuir para que aqueles conhecimentos já presentes na estrutura cognitiva do sujeito (i.e., os subsunçores) se tornem progressivamente mais estáveis, diferenciados e ricos em significados (Ausubel, Novak e Hanesian, 1980; Moreira, 2011). A própria concepção de Mach de que os experimentos mentais perpassam pelo método de variação, pode contribuir para se pensar esse tipo de experimento como facilitador de uma aprendizagem significativa.

Ao passo que um experimento mental permite variar continuamente as suas circunstâncias e, partir de sua modificação e especialização, se diversificar e se desenvolver, um estudante pode, através de um processo de diferenciação progressiva, atribuir novos significados ao conhecimento envolvido naquele experimento. A introdução de novas hipóteses, como prioriza Mach, por exemplo, em um processo que torna a experiência mental mais específica e diferenciada, pode fomentar a exploração de conhecimentos alternativos e prévios de alunos e contribuir para que a situação experimentada, com suas circunstâncias, ideias e conceitos, torne-se cada vez mais familiar; conseqüentemente, contribuir para uma aprendizagem significativa.

No livro de divulgação, Einstein explora consideravelmente o princípio de diferenciação progressiva, ainda que não intencionalmente, é claro. As experiências que desenvolve partem de nível mais alto de abstração e generalidade e passam a ficar, progressivamente, mais específicas e complexas. Com efeito, o uso desses experimentos, nesses casos, pode incentivar os leitores, enquanto alunos e/ou professores, a resolver problemas por conta própria (Sorensen, 1998). "Que este livro possa proporcionar a muitos leitores", afirma Einstein (1999, p. 7), "algumas horas de estímulo intelectual".

Lamentavelmente, o ensino das ciências naturais em geral ainda negligencia o valor conceitual e epistemológico desses experimentos. Uma das razões para isso é a ausência da história

da ciência nesse ensino. Como salienta Mach (1911, p. 16), "existe apenas um caminho para a iluminação: estudos históricos". A história da ciência pode auxiliar estudantes a entender os processos científicos, a dinâmica da ciência; a refletir sobre aspectos de sua natureza. Além disso, a educação científica pode promover habilidades imaginativas e intelectuais a partir da relação entre pensamento e experiência (Matthews, 1988).

Como destaca Kuhn (2011, p. 257), os experimentos mentais são "poderosos instrumentos no aprimoramento da compreensão humana sobre a natureza" e lidam, comumente – como no clássico experimento do trem de Einstein –, com situações que ocorrem fora do laboratório. Uma vez que experimentos de pensamento envolvem estruturas conceituais que podem levar não apenas a um novo arcabouço conceitual, mas a uma nova imagem sobre a natureza, quando pensados ao ensino podem contribuir para que o próprio aluno aprenda e reflita por meio deles.

Resgates históricos e filosóficos acerca dessa classe experimental podem ensejar, inclusive, discussões sobre a natureza da ciência no ensino. "Ter um melhor entendimento da ciência e seus processos implica em reconhecê-la não apenas como um corpo de conhecimento bem estruturado, mas como uma maneira de ver, pensar e entender o mundo e seus fenômenos, que influencia e é influenciada pelas tradições de conhecimento e de cultura onde ela é praticada" (Peduzzi e Raicik, 2020, p. 21).

Quer com vínculos explícitos, ou não, às perspectivas de Mach, Kuhn ou via história da ciência, o certo é que experimentos de pensamento podem ser utilizados no ensino de ciências como um importante recurso heurístico na proposição, discussão e estabelecimento de novas ideias, conceitos e teorias. Há perspectivas didáticas que visam, por exemplo, enaltecer as potencialidades desses experimentos ao fomentar: o seu poder de abstração e de imaginação, a construção de resultados lógicos não passíveis de serem demonstrados empiricamente, o desenvolvimento da argumentação pelos estudantes, a elaboração de práticas de modelagem e as discussões *de* e *sobre* a ciência que promovem, sobretudo pós-positivistas (Kiouranis, Souza e Santin Filho, 2010; Teixeira et al., 2010; Sampaio e Gomes, 2016; Garcia, 2019; Justi, 2015; Laterry, 2001; Reiner e Burko, 2003; Asikainen e Hirvonen, 2014; Helm e Gilbert, 1985; Matthews, 1990; Stephens e Clement; 2012).

Sem dúvidas, e fazendo alusão a consideração de Sorensen de que experimentos mentais são, de certa forma, experimentos, um resgate histórico e epistemológico desta classe de experimentos pode permitir que se discuta os papéis da experimentação no próprio desenvolvimento científico, suas distintas funções e entendimentos em diferentes momentos da história, perpassando por suas considerações na ciência moderna, antes dela e à luz do "novo experimentalismo".

Referências bibliográficas

- ASIKAINEN, M. A.; HIRVONEN, P. E. Thought experiments in science and in science education. In: MATTHEWS, M. R. (ed.). *International handbook of research in history, philosophy and science teaching*. New York: Springer, 2014.
- AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. *Psicologia educacional*. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.
- BROWN, J. R. Thought experiments since the Scientific Revolution. *International Studies in the Philosophy of Science*, v. 1, n. 1, p. 1-15, 1986.
- BROWN, J. R. Thought experiments: a platonic account. In: HOROWITZ, T.; MASSEY, G. (ed.). *Thought experiments in science and philosophy*. Lanham: Rowman & Littlefield, 1991. p. 119-128.
- BROWN, J. R. Why Experiments transcend empirism. In: HITCHCOCK, C. (ed.). *Contemporary debates in philosophy of science*. Hoboken: Blackwell, 2004. p. 23-43.
- BROWN, J. R. What do we see in a thought experimente? In: FRAPPIER, M.; MEYNELL, L.; BROWN, J. R. (org.). *Thought experiments in philosophy, science, and the arts*. New York: Taylor & Francis, 2013. p. 53-68.
- BROWN, J. R.; FEHIGE, Y. Thought experiments. *The Stanford encyclopedia of philosophy*, 2019. Disponível em: <https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/thought-experiment/>. Acesso em: jul. 2019.
- BROWN, J. R.; MEYNELL, L. FRAPPIER, M. Introduction. In: FRAPPIER, M.; MEYNELL, L. BROWN, J. R. (orgs.). *Thought experiments in philosophy, science, and the arts*. New York: Taylor & Francis, 2013. p. 1-10.
- BUTKOVIC, A. What is the function of thought experiments. *Croatian Journal of Philosophy*, v. 12, n. 19, p. 63-66, 2007.
- BUZZONI, M. Pierre Duhem and Ernst Mach on thought experiments. *HOPOS: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science*, v. 8, n. 1, p. 1-37, 2018.
- DYCK, M. V. The roles of one thought experiment in interpreting quantum mechanics: Werner Heisenberg meets Thomas Kuhn. *Philosophica*, v. 72, n. 3, p. 79-103, 2003.
- EINSTEIN, A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annals of Physics*, v. 322, n. 10, p. 891-921, 1905.
- EINSTEIN, A. Prefácio. In: BARNETT, L. *O universo e o Dr. Einstein*. São Paulo: Melhoramentos, 1964.
- EINSTEIN, A. *A teoria da relatividade especial e geral*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.
- EINSTEIN, A. Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. In: STACHEL, J. (org.). *O ano miraculoso de Einstein: cinco artigos que mudaram a face da física*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2001.
- FEHIGE, Y.; STUART, M. T. On the origins of the philosophy of thought experiments: the forerun. *Perspectives on Science*, v. 22, n. 2, p. 179-220, 2014.
- FORGE, J. Thought experiments in the philosophy of physical science. In: HOROWITZ, T.; MASSEY, G. (ed.). *Thought experiments in Science and philosophy*. Lanham: Rowman &

- Littlefield, 1991, p. 209-222.
- FRANKLIN, A. *The neglect of experiment*. New York: Cambridge University Press, 1986.
- FRAPPIER, M.; MEYNELL, L.; BROWN, J. R. (orgs.). *Thought experiments in philosophy, science, and the arts*. New York: Taylor & Francis, 2013.
- GARCIA, J. O. A imaginação como recurso heurístico na construção do conhecimento científico e algumas implicações para o ensino de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 36, n. 3, p. 660-674, 2019.
- GENDLER, T. A. *Thought experiment: on the powers and limits of imaginary cases*. New York: Garland, 2000.
- GOODING, D. C. What is experimental about thought experiments? *The Philosophy of Science Association*, v. 2, p. 280-290, 1992.
- GOODING, D. C. Experiment. In: NEWTON-SMITH, W. H. (ed.). *A companion to the philosophy of science*. Hoboken: Blackwell, 2000. p. 117-126.
- HACKING, I. Do thought experiments have a life of their own? Comments on James Brown, Nancy Nersessian and David Gooding. *The Philosophy of Science Association*, v. 2, p. 302-308, 1992.
- HACKING, I. *Representar e intervir: tópicos introdutórios de filosofia da ciência natural*. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2012.
- HARRISON, E. *A escuridão da noite: um enigma do universo*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1995.
- HELM, H.; GILBERT, J. Thought experiments and physics education – part 1. *Physics Education*, v. 20, p. 124-131, 1985.
- HITCHCOCK, C. (ed.). *Contemporary debates in philosophy of science*. Hoboken: Blackwell, 2004.
- HOLTON, G. J. Mach, Einstein, and the search for reality. In: HOLTON, G. J. *Thematic origins of scientific thought: Kepler to Einstein*. Cambridge: Harvard University Press, 1995. p. 237-277.
- HOROWITZ, T.; MASSEY, G. Introduction. In: HOROWITZ, T.; MASSEY, G. (ed.). *Thought experiments in science and philosophy*. Lanham: Rowman & Littlefield, 1991. p. 1-28. Disponível em: <http://www.tufts.edu/~skrimsky/PDF/On%20Thought%20Experiments.PDF>.
- JUSTI, R. Relações entre argumentação e modelagem no contexto da ciência e do ensino de ciências. *Revista Ensaio*, v. 17, n. especial, p. 31-48, 2015.
- KIOURANIS, N. M. M.; SOUZA, A. R.; SANTIN FILHO, O. Experimentos mentais e suas potencialidades didáticas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 32, n. 1, p. 1507.1-10, 2010.
- KOYRÉ, A. *Estudos de história do pensamento científico*. Brasília: Editora da UnB, 1982.
- KOYRÉ, A. *Estudos galilaicos*. Lisboa: Dom Quixote, 1986.
- KUHN, T. S. Uma função para as experiências mentais. In: KUHN, T. S. *A tensão essencial: estudos selecionados sobre tradição e mudança científica*. São Paulo: Unesp, 2011.
- KUJUNDZIC, N. Thought experiments: architecture and economy of thought. *Journal of the British Society for Phenomenology*, v. 26, n. 1, p. 86-93, 1995.
- LATTERY, M. Thought experiments in physics education: a simple and practical example. *Science & Education*, v. 10, p. 485-492, 2001.
- MACH, E. *Popular scientific lectures*. Chicago: The Open Court, 1895.

- MACH, E. *The history and root of the principle of the conservation of energy*. Chicago: The Open Court, 1911.
- MACH, E. *On thought experiments*. Translated and adopted by W. O. Price and Sheldon Krimsky. Tampa: University of South Florida, 1972.
- MACH, E. *Knowledge and error*. Boston: D. Reidel, 1976.
- MARTINS, R. A. Mayer e a conservação da energia. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, v. 6, p. 63-84, 1984.
- MATTHEWS, M. R. Ernst Mach and thought experiments in science education. *Research in Science Education*, v. 18, p. 251-257, 1988.
- MATTHEWS, M. R. Ernst Mach and contemporary science education reforms. *International Journal of Science Education*, v. 12, n. 3, p. 317-325, 1990.
- MOREIRA, M. A. *Aprendizagem significativa: a teoria e textos complementares*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011.
- NORTON, J. Thought experiments in Einstein's Work. In: HOROWITZ, T.; MASSEY, G. (ed.). *Thought experiments in science and philosophy*. Lanham: Rowman & Littlefield, 1991. p. 129-148.
- NORTON, J. Why thought experiments do not transcend empiricism. In: HITCHCOCK, C. (ed.). *Contemporary debates in philosophy of science*. Hoboken: Blackwell, 2004. p. 44-66.
- NORTON, J. Chasing the light: Einstein's most famous thought experiment. In: FRAPPIER, M.; MEYNELL, L.; BROWN, J. R. (org.). *Thought experiments in philosophy, science, and the arts*. New York: Taylor & Francis, 2013. p. 123-140.
- ORSTED, H. C. *Selected scientific works of Hans Christian Orsted*. Translated and edited by Karen Jelved, Andrew D. Jackson, and Ole Knudsen. New Jersey: Princeton University Press, 1997.
- PEDUZZI, L. O. Q. *Evolução dos conceitos da física*. Florianópolis: UFSC/EAD/CED/CFM, 2011. Disponível em: <https://evolucaodosconceitosdafisica.ufsc.br>. Acesso em: jul. 2019.
- PEDUZZI, L. O. Q. *Força e movimento: de Thales a Galileu*. Publicação interna. Florianópolis: Departamento de Física/Universidade Federal de Santa Catarina, 2015a (revisado em julho de 2019). 197 p. Disponível em: evolucaodosconceitosdafisica.ufsc.br. Acesso em: jul. 2019.
- PEDUZZI, L. O. Q. *A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica*. Publicação interna. Florianópolis: Departamento de Física/Universidade Federal de Santa Catarina, 2015b (revisado em julho de 2019). 259 p. Disponível em: www.evolucaodosconceitosdafisica.ufsc.br. Acesso em: jul. 2019.
- PEDUZZI, L. O. Q.; RAICIK, A. C. Sobre a natureza da ciência: asserções comentadas para uma articulação com a história da ciência. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 25, n. 2, p. 19-55, 2020.
- PRICE; W. O.; KRIMSKY, S. Translator's introduction. In: MACH, E. *On thought experiments*, 1972. p. 449-450.
- RAICIK, A. C.; GONÇALVES, F. P. (Re)Pensando Thomas Kuhn: reflexões sobre mal-entendidos da "Estrutura" e suas implicações para o ensino de ciências. *Revista de Estudos y Experiencias en Educación*, [No prelo].
- RAICIK, A. C.; PEDUZZI, L. O.; ANGOTTI, J. A. P. Experimentos exploratórios e experientia literata: (re)pensando a experimentação. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 23, n. 1, 2018.

- REINER, M.; BURKO, L. M. On the limitations of Thought experiments in physics and the consequences for physics education. *Science & Education*, v. 12, p. 365-385, 2003.
- RON, J. M. S. *El origen y desarrollo de la relatividad*. Madrid: Alianza Universidad, 1985.
- ROUSE, J. Kuhn and scientific practices. *Configurations*, v. 6, n. 1, p. 33-50, 1998.
- SAMPAIO, G. M.; GOMES, E. F. Experimentos de pensamento: uma proposta adjunta ao estudo e compreensão de conceitos físicos não experimentáveis em ambientes educacionais. *Ensino, Saúde e Ambiente*, v. 9, n. 2, p. 1-11, 2016.
- SORENSEN, R. A. Thought experiments. *American Scientist*, v. 79, n. 3, p. 250-263, 1991.
- SORENSEN, R. A. Thought experiments and the epistemology of laws. *Canadian Journal of Philosophy*, v. 22, n. 1, p. 15-44, 1992.
- SORENSEN, R. A. *Thought experiments*. New York: Oxford University Press, 1998.
- STEINLE, F. Experiments in history and philosophy of science. *Perspectives on Science*, v. 10, n. 4, 408-432, 2002.
- STEPHENS, A. L.; CLEMENT, J. J. The role of thought experiments in science and science learning. In: FRASER, B. J. et al. (eds.). *Second International Handbook of Science Education*. New York: Springer, 2012.
- STÖLTZNER, M. The dynamics of thought experiments: a comment on David Atkinson. In: GALAVOTTI, M. C. *Observation and experiment in the natural and social sciences*. Dordrecht: Springer, 2003. p. 243-258.
- TEIXEIRA, E. S.; NETO, C. P. S.; FREIRE JÚNIOR, O.; GRECA, I. M. A construção de uma argumentação sobre a síntese newtoniana a partir de atividades em grupos. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 15, n. 1, p. 61-95, 2010.
- VIDEIRA, A. A. P. O naturalismo como atitude: Mach em disputa com a metafísica. *Principia*, v. 13, n. 3, p. 371-84, 2009.

Recebido em abril de 2021

Aceito em agosto de 2021