



A Física como uma construção cultural arbitrária: Um exemplo da controvérsia sobre o status ontológico das forças inerciais

Physics as an arbitrary cultural construction: An example from the controversy on the ontological status of inertial forces

Paulo Lima Junior

Instituto de Física
Universidade de Brasília (UnB)
paulolimajr@unb.br

Fernando Lang da Silveira

Instituto de Física
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
lang@if.ufrgs.br

Fernanda Ostermann

Instituto de Física
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
fernanda@if.ufrgs.br

Nathan Carvalho Pinheiro

Universidade de Brasília - campus Planaltina
nathanpcp@unb.br

Resumo

Este artigo parte do conceito de *arbitrário cultural* da sociologia da educação de Pierre Bourdieu para argumentar que a Física é uma construção cultural arbitrária. A título de exemplo, apresenta-se uma análise crítica do status ontológico atribuído às forças inerciais na mecânica newtoniana sob a perspectiva da mecânica relacional de Ernst

Mach e André Assis. Os motivos que orientaram a escolha desse tema para caracterizar o arbitrário da Física são dois. Em primeiro lugar, reconhecer o grau de arbitrário das teorias mais hegemônicas em ciência nos coloca muito próximos de reconhecer o arbitrário da ciência como um todo. Em segundo lugar, dentre as críticas historicamente consagradas que são dirigidas à mecânica Newtoniana, o questionamento do status ontológico das forças inerciais pode ser considerado um tema bastante próximo das discussões tipicamente realizadas em aulas de Física. Assim, a escolha desse tema nos permitirá introduzir e defender a pertinência do conceito de arbitrário cultural tanto no nível mais abstrato de uma teoria sociológica do conhecimento quanto do trabalho concreto em sala de aula. Ao final dessa digressão, considerações a respeito da produção de currículos e livros didáticos para a educação científica são apresentadas.

Palavras chave: Arbitrário Cultural; Mecânica Relacional; Sociologia do Conhecimento; Pierre Bourdieu.

Abstract

This paper draws from the concept of *cultural arbitrary* from Pierre Bourdieu's sociology of education to argue that Physics is an arbitrary cultural construction. As an example, we critically analyze the ontological status attributed to inertial forces in Newtonian mechanics from the perspective of Ernst Mach and Andre Assis' relational mechanics. There are two purposes underlying the choice of this theme in planting Physics' cultural arbitrariness. First, acknowledging as arbitrary one of the most hegemonic scientific theories brings us very close to understanding that every scientific theory is arbitrary. Secondly, among the established criticisms historically directed toward Newtonian mechanics, questioning the ontological status of inertial forces might be considered closer to discussions typically performed in Physics classes. The choice of this theme will allow us to introduce the concept and argue the relevance of cultural arbitrary both in the abstract level of a sociological theory of knowledge and in the concrete reality of the science classroom. At the end of this digression, considerations regarding the production of curricula and textbooks for science education are presented.

Keywords: Cultural Arbitrary; Relational Mechanics; Sociology of Knowledge; Pierre Bourdieu.

Introdução

Ao longo das últimas décadas, o desenvolvimento e a consolidação de uma abordagem sociocultural à educação científica (CARTER, 2008; LEMKE, 2001) têm produzido um maior interesse por referenciais da sociologia da ciência e da educação. Dentre tais referenciais, destaca-se o conjunto das contribuições do sociólogo francês Pierre Bourdieu (1930-2002), uma das mais eminentes figuras da sociologia moderna e um dos cientistas sociais do século XX mais citados no mundo¹.

Bourdieu teve o mérito de formular, a partir da década de 60, uma explicação bem fundamentada com respeito às relações entre desigualdades de classe e desigualdades

¹ No ano de 2007, Bourdieu foi o segundo cientista social mais citado em livros de humanidades indexados pela Thomson Reuters' ISI Web of Science (perdendo somente para Michel Foucault por menos de 60 citações em 2500) (THE TIMES HIGHER EDUCATION, 2009).

escolares. Embora a ampliação historicamente recente do acesso de camadas populares à escola tenha tornado essas relações mais difíceis de perceber, há ampla evidência empírica de que a origem social dos estudantes ainda cumpre um papel muito importante para determinar suas chances objetivas de sucesso escolar². Nesse sentido, a teoria de Bourdieu tem sido amplamente revisada, expandida e apropriada para os mais diversos propósitos com destaque para o estudo das relações entre família e escola (NOGUEIRA; ROMANELLI; ZAGO, 2011) e a elaboração crítica de uma sociologia no plano individual (LAHIRE, 2006).

Ao lado de suas aplicações típicas em sociologia da educação (tal como ocorre nos estudos das trajetórias escolares de sucesso e sua relação com a origem social dos estudantes), é preciso destacar que a obra de Bourdieu transita em diversas esferas das ciências sociais, abordando temas tão distintos quanto religião, arte, escola, literatura, imprensa e ciência (NOGUEIRA; NOGUEIRA, 2009). Em suas pesquisas, Bourdieu revela que é possível abordar temas radicalmente diferentes com ferramentas teóricas e metodológicas muito semelhantes sem deixar escapar as particularidades de cada um desses temas. Assim, ao mesmo tempo em que oferece uma teoria geral sobre a organização da sociedade em classes e sobre como desigualdades de classe estão relacionadas a desigualdades escolares, Bourdieu também fornece elementos para uma sociologia do conhecimento e do funcionamento do campo científico (BOURDIEU, 2004). De fato, é possível afirmar que esse caráter integrador da obra de Bourdieu tem contribuído decisivamente para que um número cada vez maior de pesquisadores com propósitos bastante distintos se mobilize em torno da apropriação e atualização dessa obra.

Na base de sua teoria sobre o sistema escolar e por meio do conceito de *arbitrário cultural*, Bourdieu (BOURDIEU; PASSERON, 2009) planta argumentos tão contundentes sobre a natureza da cultura que é muito difícil pensar uma apropriação de sua obra para a pesquisa em educação científica sem indagar: Qual visão de ciência seria subjacente à sociologia de Bourdieu? De que maneira conceitos da sociologia de Bourdieu podem auxiliar a construir perspectivas mais sociais sobre a natureza da cultura científica?

Este artigo parte do conceito de *arbitrário cultural* (BOURDIEU; PASSERON, 2009), para argumentar que *a Física é uma construção cultural arbitrária*. A título de exemplo, apresenta-se uma análise crítica do *status ontológico atribuído às forças inerciais na mecânica newtoniana* (ZYLBERSZTAJN; ASSIS, 1999). Os motivos que orientaram a escolha desse tema para caracterizar o arbitrário da Física são dois. Em primeiro lugar, tratando-se a mecânica newtoniana de uma teoria consagrada e hegemônica em seu próprio domínio (dinâmica de corpos macroscópicos a baixas energias), percebê-la como construção arbitrária é particularmente desafiador. Reconhecer o grau de arbitrário das teorias mais hegemônicas em ciência nos coloca muito próximos de reconhecer o arbitrário da ciência como um todo.

Em segundo lugar, dentre as críticas historicamente consagradas que são dirigidas à mecânica Newtoniana (MACH, 1960; ASSIS, 2013) o questionamento do status ontológico das forças inerciais é um tema bastante próximo das discussões tipicamente

² Dentre as evidências internacionais de que o sucesso em ciência escolar não está ligado somente às aptidões individuais, mas também à origem social do estudante, destaca-se o relatório executivo do *Programme for International Student Assessment* (PISA) referente ao ano de 2006 (OECD, 2007).

realizadas em aulas de Física. Quantos professores de Física nunca insistiram com seus alunos que força centrífuga não existe? Assim, a escolha desse tema nos permitirá introduzir e defender a pertinência do conceito de *arbitrário cultural* tanto no nível mais abstrato de uma teoria sociológica do conhecimento quanto do trabalho concreto em sala de aula.

Ao final dessa digressão ilustrativa do conceito de *arbitrário cultural*, considerações a respeito da objetividade científica e da produção de currículos e livros didáticos para as ciências são apresentadas.

Visões de ciência em Bourdieu

O conceito de arbitrário cultural

Não constitui fato novo o reconhecimento de que o conhecimento científico é temporário. Em outras palavras, sabemos que evidência empírica e argumentos teóricos jamais comprovam ou justificam uma teoria científica de maneira definitiva. Todo o conhecimento científico é tão tentativo que, eventualmente, chega a ser substituído. Em aparente concordância com essa visão, encontramos, na base da abordagem sociológica de Bourdieu e Passeron (2009), a asserção de que *todos os sistemas simbólicos* (tais como ciência, moral, religião, arte) *são construções culturais arbitrárias* pois nenhum deles pode ser deduzido na sua integralidade a partir de quaisquer princípios universais (de natureza filosófica, lógica, empírica). Com isso, nenhum sistema simbólico (eg., teorias científicas) poderá ser justificado pela natureza das coisas ou pela força da razão.

A particularidade da perspectiva bourdiana fica mais evidente na sua afirmação de que *“cada esforço educacional de impor a legitimidade do conhecimento escolar pressupõe, em alguma medida, dissimular o arbitrário desse conhecimento”* (LIMA JUNIOR; SILVEIRA; OSTERMANN, 2013, p.2-3). Transportando essa ideia para o contexto da educação científica, uma leitura atenta de Bourdieu nos leva a reconhecer que o ensino de ciências deve ser constituído pelo esforço (quase sempre inconsciente) *“de tornar as teorias científicas mais justificáveis do que realmente são em vista de evidências empíricas e argumentos teóricos disponíveis”* (idem).

O argumento em destaque aqui pode ser destrinchado em dois níveis. Em primeiro lugar, é utilizado o conceito de *arbitrário cultural* para designar qualquer sistema simbólico parcialmente injustificado. Em segundo lugar, percebemos que o reconhecimento do arbitrário de todos os sistemas simbólicos traz consigo um impasse de legitimidade: é impraticável impor como legítima uma ideia ou uma teoria sem dissimular o seu arbitrário. Em outras palavras, a *dissimulação do arbitrário* não é um acontecimento eventual, mas sociologicamente necessário.

O sentido do arbitrário em Bourdieu

Nesse momento, cumpre esclarecer que a palavra *arbitrário* em Bourdieu tem um uso muito bem definido. Diferente do que ocorre na maioria dos textos de matemática, *a palavra arbitrário jamais é empregada por Bourdieu como sinônimo de aleatório*. No fragmento *“considere um número natural arbitrário entre 0 e 100”*, arbitrário designa

uma escolha aleatória: realmente não importa qual número vamos escolher. Um emprego bastante diferente da mesma palavra ocorre nos esportes competitivos em que um *árbitro* precisa julgar uma falta (eg., futebol) ou atribuir uma nota ao competidor (eg., ginástica olímpica). Arbitrar, nesses casos, sempre significa fazer uma escolha bastante informada. É preciso conhecer muito bem as regras do jogo, levar em consideração o lance propriamente dito e compará-lo com arbitragens anteriores que possam ser consideradas bem sucedidas.

Justamente por demandar conhecimentos e práticas específicas, não é qualquer ator que estará habilitado a ser um árbitro e, evidentemente, as escolhas dos árbitros *jamais poderiam ser aleatórias*. Por outro lado, “todos os árbitros são sempre arbitrários no sentido em que suas escolhas, ainda que muito bem orientadas e eventualmente inequívocas, são sempre escolhas” (LIMA JUNIOR; SILVEIRA; OSTERMANN, 2013, p. 3). É tão usual avaliar o trabalho dos árbitros, que, em lances duvidosos, as emissoras de televisão geralmente confrontam a decisão do árbitro em campo com outro profissional experiente o suficiente para fazer críticas legítimas. Assim, é justamente no confronto “entre dois árbitros considerados legítimos que tomamos maior consciência de que suas escolhas são arbitrárias e que não há um princípio universal sequer que as justifique definitivamente e por completo” (ibid., p.3).

A rigor, nenhuma construção simbólica (seja ela científica, artística ou teológica) poderia resultar de uma combinação rigorosamente aleatória de sentidos por uma simples razão: todas essas construções precisam ser inteligíveis como condição de sua perpetuação. Segundo a análise de Bourdieu, mesmo as escolas de criação artística mais arbitrárias precisam ser minimamente inteligíveis (não-aleatórias) para que suas práticas possam ser ensinadas e aprendidas. Essa questão afasta por completo a acusação de que Bourdieu seria um relativista ingênuo e que construir uma visão de ciência a partir dele significa aceitar que tudo vale. A posição de Bourdieu é tão somente “que a cultura imposta sempre tem caráter arbitrário na medida em que sempre envolve escolhas que jamais se justificam completamente a partir de princípios universais” (LIMA JUNIOR; SILVEIRA; OSTERMANN, 2013, p.3).

Como identificar um arbitrário cultural?

A tomada de consciência do arbitrário de um sistema simbólico sempre passa por algum tipo de análise comparativa (LIMA JUNIOR; SILVEIRA; OSTERMANN, 2013, p.5):

A necessidade de comparar sistemas concorrentes para que sejamos capazes de perceber seu arbitrário está intimamente ligada à ideia de que é impossível apreender um sistema simbólico a partir de um ponto de vista completamente neutro e externo a qualquer outra cultura. Assim, a crítica dirigida a qualquer sistema (teorias ou modelos científicos, por exemplo), tão cara a qualquer forma de racionalidade científica, sempre pressupõe um sistema simbólico alternativo e igualmente arbitrário.

Ainda que sob perspectivas sensivelmente diferentes, a importância do confronto entre sistemas simbólicos concorrentes no desenvolvimento da ciência tem sido sublinhada por alguns autores da filosofia da ciência do século XX (KUHN, 1982; LAKATOS, 1993; LAUDAN, 1986). Isso pode ser observado, por exemplo, ao se afirmar que um resultado experimental não explicado por um paradigma, programa ou tradição de pesquisa (i.e.,

uma *anomalia*) só se torna efetivamente uma contraevidência quando passa a ser explicado por seu concorrente. Segundo Bourdieu, toda a vez que o arbitrário de uma cultura é denunciado e deslegitimado, legitima-se o arbitrário da denúncia. Igualmente, toda a crítica eficaz que se dirige contra um *arbitrário cultural*, pressupõe outro arbitrário que a realize.

A Física como arbitrário cultural

Em contraste com o que ocorre nas disciplinas de ciências humanas e sociais, não é usual ensinar teorias concorrentes em Física. Apesar de existirem alternativas teóricas à mecânica newtoniana e ao eletromagnetismo de Maxwell e Lorentz (cf. ASSIS, 1995; 2013), somente essas duas teorias são encontradas nos nossos livros didáticos – tanto na escola quanto na universidade. É como se os currículos de ciências operassem um tipo de silenciamento até mesmo sobre as controvérsias científicas mais legítimas. Resulta desse silenciamento que a maioria dos Físicos não conheça (nem reconheça) alternativa às teorias hegemônicas dentro das quais foi educado. Mesmo sendo eventualmente capazes de criticar tais teorias, o profissional da Física (pesquisador e/ou professor) deverá se contentar, por exemplo, com a formulação de Maxwell-Lorentz do eletromagnetismo por falta de alternativas.

Embora o *silenciamento das controvérsias* não seja planejado de maneira consciente pelos professores de Física, ela cumpre um papel importante na dissimulação do arbitrário da Física na medida em que torna mais difícil que os praticantes dessa ciência adotem uma posição crítica e contundente com relação a essas teorias em seus próprios domínios de validade. Retomando a comparação com as ciências humanas e sociais, onde há sempre muitas teorias concorrendo pelas explicações de um mesmo fenômeno, parece ser mais usual nas ciências da natureza a substituição do modelo da realidade pela realidade do modelo; a substituição do debate vivo em torno das controvérsias científicas por representações estáticas da natureza que, sem concorrentes, podem ser igualadas a ela sem dificuldades.

Levando em consideração a importância de exemplificar o arbitrário cultural da Física que temos argumentado aqui somente no nível teórico, este ensaio recupera algumas das críticas que o físico e filósofo Ernst Mach (1960) elaborou com relação à mecânica newtoniana (1990). Nossa aproximação às reflexões do filósofo Ernst Mach encontra-se mediada pela chamada *mecânica relacional* do físico brasileiro André Assis. Mais precisamente, damos ênfase a questão do *status ontológico dado às forças inerciais* (ZYLBERSTAJN e ASSIS, 1999) em Newton e Assis. Nossa pequena digressão histórica tem o propósito de responder à seguinte questão: De que maneira a mecânica relacional de Mach-Assis nos permite perceber o arbitrário da mecânica newtoniana?

Sobre o status ontológico das forças inerciais

Ontologia é a dimensão da filosofia em que são tratadas questões relativas à natureza e existência real dos seres³. Assim, quando questionamos se certo ente físico existe

³ A partir dos radicais gregos que formam a palavra “ontologia”, algumas traduções possíveis desse conceito são “conhecimento do ser”, “saber sobre aquilo que é”, “teoria da existência”. Segundo o

realmente ou é um artifício (teórico, matemático, pictórico), um mero instrumento que usamos para representar e explicar um fenômeno, estamos levantando aí uma questão de caráter ontológico. Sobre o status ontológico atribuído às chamadas forças inerciais – que pode ser compreendido, em princípio, como a questão da existência ou inexistência real dessas forças – a teoria newtoniana, ao menos em sua versão escolar, apresenta uma resposta clara: *forças inerciais são artifícios, entes fictícios e sem realização concreta, que nos permitem investigar fenômenos mecânicos a partir de referenciais não-inerciais* (referenciais em que, a rigor, as leis de Newton não se sustentam completamente) (MÁXIMO; ALVARENGA, 2010). Posicionamento semelhante encontra-se em um texto de mecânica muito utilizado em nossos cursos de graduação em Física quando os autores consideram “artificial”, embora muito útil, a introdução de forças fictícias para utilizar as Leis de Newton em sistemas não-inerciais (MARION; THORNTON, 1995). Assim, qualquer discussão sobre as forças inerciais não pode fugir à análise dos conceitos de inércia e referencial inercial.

Apesar da posição hegemônica adotada na mecânica escolar quanto ao status ontológico das forças inerciais, é preciso reconhecer que a controvérsia histórica sobre a possível realidade das forças “fictícias” nunca esteve completamente resolvida. No contexto do Instituto de Física da UF... (e, provavelmente em outras universidades brasileiras), a influência da mecânica relacional desenvolvida pelo físico brasileiro André Assis (ASSIS, 1989; 2013) como teoria alternativa à mecânica newtoniana tem produzido, direta ou indiretamente, das salas de aula aos corredores, uma variedade de debates com respeito ao status ontológico das forças inerciais. Tais debates tendem a remeter alunos e professores não somente a um olhar crítico sobre os fundamentos da teoria newtoniana, mas ao reconhecimento mais ou menos consciente de que, por trás da defesa da hegemonia da versão escolar da mecânica newtoniana, não se encontra somente uma série de evidências empíricas aliadas a argumentos lógicos e teóricos, mas a dissimulação das controvérsias fundamentais dessa teoria.

A necessidade do espaço absoluto em Newton

A definição usual de referencial inercial⁴ apresenta uma circularidade que não é muito difícil de perceber (EINSTEIN; INFELD, 1966; POINCARÉ, 1913, pp.93-96; ZYLBERSZTAJN; ASSIS, 1999). Segundo Newton (1990), “todo o corpo continua seu estado de repouso, ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele”. Entretanto, qualquer iniciado em mecânica newtoniana sabe que somente um conjunto muito limitado de referenciais satisfaz essa lei e tais referenciais são ditos inerciais. Nisto consiste a referida circularidade: o princípio da inércia só é efetivamente observado nos referenciais inerciais e referenciais inerciais são, por definição, aqueles para os quais vale o princípio da inércia!

Ao menos no nível mais abstrato da teoria, Newton resolve essa circularidade postu-lando o espaço absoluto que, imóvel e intangível, seria o referencial com relação ao qual são

Vocabulário Técnico e Crítico da Filosofia (LALANDE, 1993, p.767), ontologia é “o estudo ou conhecimento do que são as coisas em si mesmo, (...) por oposição ao estudo das suas aparências ou de seus atributos”.

⁴ Sistema de referência que satisfaz o princípio da inércia.

avaliados os movimentos verdadeiros dos corpos. Newton justifica a distinção entre movimento verdadeiro e movimento relativo nos seguintes termos:

As causas pelas quais movimentos verdadeiros e relativos são diferenciados um do outro são as forças imprimidas sobre os corpos para gerar movimento. O movimento verdadeiro não é nem gerado nem alterado, a não ser por alguma força imprimida sobre o corpo movido; mas o movimento relativo pode ser gerado ou alterado sem qualquer força imprimida sobre o corpo. Pois é suficiente apenas exercer alguma força sobre os outros corpos com os quais o primeiro é comparado [...] (NEWTON, 1990, p.10)

Nessa perspectiva, os referenciais inerciais podem ser definidos pelo conjunto de todos os corpos que transladam, sem girar, com velocidade constante em relação ao espaço absoluto. Assim, devido aos referenciais inerciais apresentarem, por essa definição, aceleração verdadeiramente nula, as acelerações de todos os outros corpos do universo com relação a esses referenciais privilegiados devem ser iguais às suas acelerações verdadeiras e as leis de Newton, definidas para movimentos verdadeiros com relação ao espaço absoluto, também se sustentarão nos referenciais inerciais. Enfim, apesar de o espaço absoluto ser intangível por definição, para sustentar sua existência deve ser suficiente apresentar alguma evidência de que podemos avaliar o estado de movimento de um corpo sem que, para isso, seja necessário fazer referência a um observador externo. Segundo a lógica de Newton, se nós pudermos detectar o movimento verdadeiro de um corpo, isto será evidência de que existe um espaço absoluto com relação ao qual esse corpo se movimenta verdadeiramente.

Como evidência empírica da existência do espaço absoluto, Newton (1990, pp.6-14) apresenta um experimento simples de realizar que consiste em suspender um balde com água por uma corda e colocar o balde a girar em torno do seu próprio eixo (Figura 1). Como resultado, observa-se que a superfície de água no interior do balde fica tão mais curva, assumindo a forma de um parabolóide de rotação, quanto maior for sua velocidade de rotação.

Assim, mesmo que elegêssemos um sistema de referência interno ao balde, nós seríamos capazes de avaliar se o balde está verdadeiramente em movimento ou em repouso sem que, para isso, seja necessário fazer referência a um sistema de referência externo. Se a curvatura da superfície de água fosse devida ao movimento do balde em relação a qualquer coisa ao seu redor (por exemplo, as paredes do laboratório) a superfície da água deveria se curvar no caso de o balde estar parado e o laboratório girando em torno do balde, pois nas duas situações, o movimento relativo é o mesmo. Segundo Newton, o experimento do balde pode ser considerado evidência empírica de que certos movimentos são absolutos.

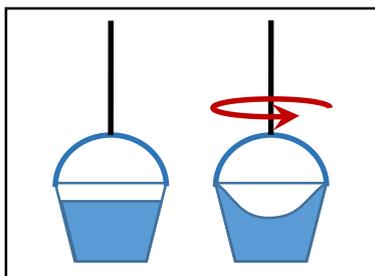


Figura 1: Representação do experimento do balde de Newton.

O experimento do balde tornou-se consagrado historicamente, mas os livros didáticos trazem uma série de outras situações experimentais que produzem o mesmo efeito: justificar empiricamente que podemos distinguir entre movimentos absolutos e relativos. Uma situação frequentemente evocada quando da introdução do conceito de inércia é o que ocorre quando um veículo freia bruscamente e os passageiros em seu interior são lançados para frente. Diferente do que vale para a velocidade do veículo, que só pode ser determinada com relação a um referencial externo (a estrada ou outro veículo), sua aceleração, ao menos sob a perspectiva newtoniana, não precisa tomar outro corpo material como referência para ser avaliada. Sem olhar para a janela, o passageiro não pode distinguir entre movimento e repouso, mas ele definitivamente distingue quando está sendo acelerado ou não. Outro exemplo bastante mais sofisticado, que também pode ser considerado evidência da existência de movimentos verdadeiros (com relação ao espaço absoluto), é o chamado pêndulo de Foucault (GOLDSTEIN, 1980, pp.177-182), que não permite somente determinar que a Terra está efetivamente girando no espaço (absoluto), mas também sua velocidade de rotação nesse espaço.

Enfim, as forças inerciais seriam, na perspectiva de Newton, efeitos de causas inerciais que surgem quando estamos observando um fenômeno a partir de um referencial não-inercial (tal como o balde girando, um veículo freado bruscamente, o pêndulo de Foucault). Em um sistema de referência em repouso sobre a borda do balde, para se explicar a curvatura da superfície da água, necessita-se assumir que a água está sofrendo uma força inercial radial (sentido para fora), usualmente chamada força centrífuga. Um passageiro que queira explicar porque os corpos no interior do veículo são arremessados para frente durante a frenagem, precisa imputar a esses corpos uma força de inércia de translação. Um observador que, tendo elegido como sistema de referência as paredes do museu onde existe um pêndulo de Foucault, precisa se referir à chamada força de Coriolis para explicar a rotação do plano de oscilação do pêndulo. Todas essas são forças inerciais e a ideia de que forças inerciais são causas fictícias para explicar alguns efeitos está intimamente ligada à crença de que há movimentos absolutos e relativos e que somente alguns referenciais (mais privilegiados) são capazes de apreender os movimentos que os corpos verdadeiramente realizam.

Do balde de Newton ao princípio de Mach

Apesar de o argumento newtoniano ser minimamente coerente, a existência de um espaço absoluto, intangível e imóvel (ao lado dos movimentos absolutos com relação a esse espaço) nunca foi completamente aceita por cientistas e filósofos desde a época de Newton. No continente o filósofo e matemático racionalista alemão Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) negou a existência do espaço absoluto por não se coadunar com o “princípio da razão suficiente”; na ilha, o filósofo empirista irlandês e bispo anglicano George Berkeley (1685-1753) criticou as ideias de espaço e tempo absolutos de Newton e a realidade das forças (as forças da mecânica newtoniana seriam análogas aos epiciclos na astronomia) (LOSEE, 1979). Mas foi com Ernst Mach que as críticas à teoria newtoniana ganharam sua forma atual (ASSIS, 2013). A perspectiva empirista de Mach, muito semelhante à de Berkeley, parte do pressuposto de que qualquer teoria científica deve rejeitar afirmações sobre entes metafísicos (que estão para além de toda experiência sensível, portanto, entes transempíricos). Contudo, abandonar a ideia

metafísica da existência de um espaço absoluto implica assumir que *todos os movimentos são sempre relativos e que fenômenos cinematicamente idênticos devem ser dinamicamente equivalentes*.

Com razão, Mach argumenta que o experimento do balde de Newton não é evidência definitiva da existência do espaço absoluto, pois ele não elimina a possibilidade de que a deformação na superfície da água seja devida ao seu movimento com relação às estrelas distantes. Assim, para que o experimento do balde funcione efetivamente como evidência da existência de movimentos absolutos, seria preciso manter o balde em repouso e, girando todo o universo, perceber que a superfície de água não se deforma (ASSIS, 2013). Se a hipótese de Mach estiver correta, girar o balde mantendo toda a matéria do universo em repouso deve ser equivalente a girar o universo mantendo o balde em repouso, pois as duas situações são cinematicamente idênticas (Figura 2).

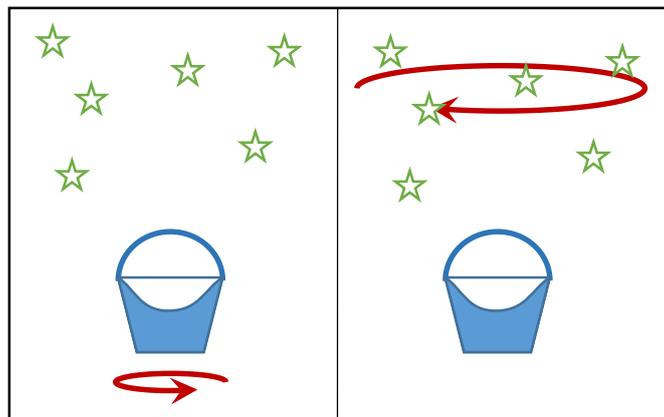


Figura 2. Representação esquemática da hipótese de Mach.

Como é possível perceber, o argumento de Mach neutraliza completamente a evidência empírica apresentada por Newton sobre a existência de movimentos não-relativos. Por outro lado, ele não chega a produzir evidência definitiva em favor da inexistência do espaço absoluto. Assim, é importante destacar que as críticas de Mach plantam uma discussão que não termina (e nem poderia terminar) no campo da filosofia, sendo possível imaginar, a partir do seu argumento, uma série de novos experimentos capazes de produzir evidência favorável à existência ou inexistência de movimentos absolutos.

Como já argumentamos, a ideia newtoniana de espaço absoluto está intimamente relacionada ao seu conceito de inércia. Do ponto de vista newtoniano, em última análise, é por inércia que a superfície de água se deforma no balde em rotação. Ao lado disso, por risível que possa parecer, Newton (1990) define a quantidade de inércia de um corpo, conceito tão fundamental em sua teoria, a partir do produto da sua densidade pelo seu volume! Mach (1960) destaca corretamente que essa é uma pseudo-definição⁵. A definição newtoniana tão somente sugere que massa é uma propriedade intrínseca aos corpos considerados em sua individualidade e, portanto, a resistência à mudança de estado de movimento desses corpos está definida pelos seus materiais e dimensões e não pelas suas relações com o resto dos corpos massivos do universo.

⁵ Trata-se de uma pseudo-definição na medida em que definir massa como o produto da densidade pelo volume supõe a existência de uma definição de densidade que não seja a razão da massa pelo volume.

Como deve ser possível perceber, o contra-argumento de Mach para o experimento do balde implica que a inércia (relacionada ao acúmulo de água na periferia do balde) não pode ser uma propriedade intrínseca da água, mas deve resultar da sua interação com o resto do universo. Assim, ficou conhecido como princípio de Mach (ASSIS; PESSOA JUNIOR, 2001) a ideia de que *a inércia de qualquer corpo não é uma propriedade intrínseca desse corpo, mas um resultado de sua interação com os outros corpos.*

De Mach à mecânica relacional

É bastante conhecido o fato de que a teoria geral da relatividade foi elaborada sob influência das ideias de Mach. Segundo Einstein, uma teoria que implemente o princípio de Mach deve apresentar quatro implicações (ASSIS; PESSOA JUNIOR, 2001): (1) a inércia dos corpos deve aumentar se forem acumuladas massas ponderáveis na sua vizinhança; (2) um corpo deve sofrer uma força aceleradora quando massas vizinhas são aceleradas; (3) um corpo em movimento de um movimento de rotação deve produzir no seu interior um campo que corresponda às forças inerciais de rotação⁶; e, finalmente (4) um corpo em um universo vazio não deve apresentar inércia, pois toda a inércia dos corpos resulta da sua interação com outros corpos ponderáveis do universo.

Em um primeiro momento, Einstein acreditou realmente que sua teoria avançava com relação à teoria newtoniana no sentido de dar conta de responder às críticas de Mach. Entretanto, ele foi levado, aos poucos, a perceber que a teoria geral da relatividade não é propriamente uma teoria machiana. Na segunda metade do século XX, vários pesquisadores se dedicaram a traçar a origem da inércia dos corpos (ASSIS; GRANEAU, 1995), porém, foi somente ao final da década de 1980 que o brasileiro André Assis (2013) publica uma teoria que, conhecida por *mecânica relacional*, implementa integralmente o princípio de Mach.

Assis chamou originalmente sua mecânica relacional de modelo de Mach-Weber (ASSIS e GRANEAU, 1995), pois se trata de uma expansão da eletrodinâmica de Weber para o contexto da gravitação com o propósito de satisfazer o princípio de Mach. Assim como em Newton, a mecânica de Assis (1989) está baseada em três axiomas: (1) força é uma quantidade vetorial; (2) a força que um corpo material A exerce em um corpo material B é igual e oposta à força que B exerce em A (princípio da ação e reação); (3) a soma de todas as forças em qualquer corpo material é nula.

Ao lado desses três axiomas, Assis acrescenta uma lei de gravitação inspirada na força de Weber para duas partículas carregadas. Segundo Assis (1989), a força gravitacional que uma partícula massiva j exerce em outra partícula massiva i quando estão separadas por um vácuo perfeito é dada por:

⁶ Essa implicação é particularmente importante para que se sustente a crítica de Mach ao experimento do balde de Newton: o que observamos em um balde girando com relação ao resto do universo deve ser completamente equivalente ao que ocorre com o universo girando em torno de um balde em repouso. Igualmente, um pêndulo de Foucault, que, na superfície de um planeta em rotação, tem seu movimento de precessão relacionado à força inercial de Coriolis, deve apresentar o mesmo movimento se a Terra for considerada em repouso e o universo estiver girando ao seu redor.

$$\vec{F}_{ji} = -H_g m_i m_j \frac{\hat{r}_{ij}}{r_{ij}^2} \left[1 + \frac{6}{c^2} \left(r_{ij} \ddot{r}_{ij} - \frac{\dot{r}_{ij}^2}{2} \right) \right] \quad \text{Equação 1}$$

Nessa expressão, o vetor de módulo r_{ij} determina a posição da partícula i com relação à partícula j ; as quantidades m_i e m_j podem ser consideradas massas gravitacionais; c é a velocidade da luz no vácuo e H_g é uma constante da natureza.

A lei da gravitação proposta por Assis pode ser dividida basicamente em dois termos. O primeiro, a menos de uma constante multiplicativa, é idêntico à lei newtoniana da gravitação. De fato, assim como ocorre em Newton, o primeiro termo da lei de Assis tem contribuição nula para qualquer corpo colocado no interior de uma casca esférica uniforme (Figura 3). O segundo termo, por sua vez, depende do inverso da velocidade da luz ao quadrado. Ou seja, esse termo não será desprezível somente quando seu numerador assumir valores realmente muito elevados (por exemplo, na interação de uma massa m_i qualquer e todos os outros corpos ponderáveis do universo). A saber, é possível demonstrar que, se aproximarmos o conjunto de todos os corpos massivos do universo por uma casca esférica homogênea livre para girar e transladar com relação ao corpo de massa m_i posto em seu interior (Figura 3), o segundo termo da lei de gravitação de Assis [Equação 1] produzirá, no interior dessa casca, um campo de forças simplesmente idêntico às forças inerciais de rotação e translação (ASSIS; GRANEAU, 1995). Com isso, “na mecânica relacional, as forças inerciais não são fictícias, mas de natureza gravitacional” (LIMA JUNIOR; SILVEIRA; OSTERMANN, 2013, p.5).

Assis (1989) destaca que sua lei da gravitação tem algumas propriedades muito importantes: (1) ela depende somente das distâncias, velocidades e acelerações relativas das partículas, dispensando, portanto, qualquer referência a referenciais inerciais, movimentos verdadeiros ou espaço absoluto; (2) ela satisfaz o princípio da ação e reação estritamente⁷; (3) as equações do movimento são obtidas pelo terceiro postulado ao lado da lei da gravitação.

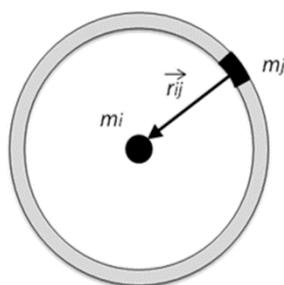


Figura 3: Representação de um corpo com massa gravitacional m_i interagindo com um elemento m_j de uma grande casca esférica massiva que representa toda a massa do universo.

⁷ É bastante conhecido o fato de que, em algumas situações, a eletrodinâmica de Maxwell-Lorentz não satisfaz a lei da ação e reação. Por exemplo, quando duas cargas puntiformes viajam ao longo de eixos perpendiculares em direção à origem do sistema de coordenadas, as forças (de natureza eletromagnética) exercidas reciprocamente entre essas duas cargas não estão na mesma direção, como prescrito pela terceira lei de Newton (GRIFFITHS, 1999). Em contraste com a eletrodinâmica de Maxwell-Lorentz, a eletrodinâmica de Weber (de onde Assis buscou inspiração para sua lei da gravitação) respeita o princípio da ação e reação rigorosamente.

Mecânica relacional e newtoniana

Para o leitor iniciado em mecânica newtoniana, a afirmação de que a soma das forças em um corpo deve ser sempre igual a zero pode parecer sem sentido. Afinal, na mecânica de Newton, a força imprimida sobre um corpo só é nula nas circunstâncias em que, pelo princípio da inércia, o corpo preserva seu estado de movimento. De fato, a mecânica de Assis é radicalmente diferente. Nela, a inércia, origem dos principais problemas conceituais e filosóficos da teoria newtoniana, não é afirmada como princípio. Pelo contrário, todos os efeitos inerciais resultam efetivamente da interação gravitacional dos corpos com o restante do universo.

Por exemplo, para escrever a equação de movimento de um corpo em queda livre na superfície da Terra segundo a mecânica relacional, é preciso considerar: (1) a interação do corpo em estudo com a Terra, que produzirá a força peso imprimida sobre o corpo; (2) a interação do corpo em estudo com todos os outros corpos massivos do universo (geralmente representados de maneira aproximada por uma grande casca esférica homogênea), que produzirá termos equivalentes a cada uma das forças inerciais de translação e rotação (inclusive um termo matematicamente idêntico ao produto da massa pela aceleração que constitui a segunda lei de Newton) (ASSIS; GRANEAU, 1995).

Ao menos em princípio, *todas as equações de movimento bem sucedidas empiricamente que poderiam ser obtidas pela aplicação das leis de Newton podem ser obtidas a partir da mecânica de Assis*. Além disso, podemos apontar as seguintes implicações conceituais dessa mecânica:

- Como ela não postula uma massa inercial, mas afirma que todos os efeitos inerciais resultam de interações gravitacionais, a mecânica relacional explica a igualdade entre massa inercial e gravitacional.
- Como os efeitos inerciais dos corpos resultam fundamentalmente das suas interações gravitacionais com corpos ponderáveis distantes, a mecânica relacional explica a observação empírica de que a vorticidade do universo é nula ou próxima de zero⁸.
- Na mecânica relacional, não há entes metafísicos como o espaço absoluto, movimentos verdadeiros e referenciais inerciais.
- Forças inerciais são forças gravitacionais e obedecem ao princípio da ação e reação tal como qualquer outra força.

Embora o processo histórico que levou à produção da mecânica relacional esteja intimamente ligado ao campo da filosofia, é preciso destacar que, além de explicar uma

⁸ Leibniz, contemporâneo de Newton, já afirmava que o conjunto dos corpos celestes distantes, chamados corriqueiramente de “estrelas fixas” (nomenclatura extremamente infeliz, dado que esses corpos nem são todas estrelas e muito menos estão fixos) seria um bom substituto para o espaço absoluto (ASSIS, 2013). Com efeito, tal como uma formiga na borda de um balde é capaz de estimar a vorticidade da água que gira com o balde, assumindo a existência do espaço absoluto, é possível medir a vorticidade do universo, ou seja, medir a velocidade angular com que ele gira *verdadeiramente*. Observações experimentais resultam que o universo tem vorticidade nula (ou tão próxima de zero que não pode ser detectada). Para a mecânica de Newton, a vorticidade nula do universo é uma casualidade. Para a mecânica relacional, essa é uma implicação direta de se afirmar que a inércia dos corpos emerge de seus movimentos relativos ao restante das massas ponderáveis do universo. Se um balde com água é posto a girar junto com as “estrelas fixas”, segundo a mecânica relacional, nenhuma vorticidade deve ser observada!

série de fenômenos que a mecânica newtoniana já explica, a mecânica relacional é bem sucedida na explicação de outros não explicados por aquela (tal como a precessão do periélio, explicada também pela teoria geral da relatividade) (ASSIS, 1989). Assim, é preciso reconhecer que, embora a mecânica relacional tenha sua origem em uma contestação filosófica, ela é hoje uma teoria distinta, com algumas consequências diversas da mecânica newtoniana e, portanto, empiricamente contrastável com a mecânica newtoniana. Definitivamente a mecânica relacional não pode ser considerada, nos dias de hoje, simplesmente uma reinterpretação da mecânica de Newton⁹.

Por que a mecânica relacional não incomoda a hegemonia newtoniana?

Em primeiro lugar, é preciso destacar que a produção das evidências empíricas que corroborariam a mecânica relacional para além da mecânica de Newton (como no caso do periélio anômalo de Mercúrio) é muito escassa e poucos são os pesquisadores que têm se mobilizado em torno desse projeto. Uma análise rápida das referências apresentadas por Assis em seus artigos mais recentes mostra que a mobilização da comunidade em torno da sua teoria é realmente muito pequena.

Enfim, tendo apresentado até aqui uma breve reconstrução racional do processo histórico que conduziu à produção da mecânica relacional, poderíamos perguntar: (1) por que há tão poucos cientistas mobilizados em torno da mecânica relacional? (2) se a mecânica relacional é mais bem sucedida filosófica e empiricamente, por qual razão a mecânica de Newton se mantém hegemônica na física escolar?

Com efeito, questões como essas jamais podem ser respondidas completamente se analisamos a ciência e a história da ciência apartadas das relações de poder que constituem a produção e a reprodução do conhecimento científico. Quem são os cientistas que trabalham com fundamentos de Física hoje? Quão prestigiado é o autor da mecânica relacional dentro comunidade científica brasileira? Qual é o status acadêmico dos pesquisadores que reconhecem a consistência do trabalho de Assis? Qual é a visibilidade e o reconhecimento da mecânica de Assis para os autores, editores e avaliadores de livros didáticos?

É justamente quando levantamos questões dessa natureza que estamos nos deslocando de uma visão da “ciência pela ciência” para uma percepção mais sociológica dos processos de produção e consagração das hegemonias científicas (elementos fundamentais para a produção de currículos em ensino de Física). Enfim, a discussão do status ontológico das forças inerciais é um terreno fértil para plantar controvérsias na mecânica newtoniana e começar a percebê-la como *arbitrário cultural*.

⁹ O leitor familiarizado com os debates em torno da mecânica relacional deve estar sentindo falta de nós a compararmos às teorias da relatividade de Einstein. Essa comparação é, de fato, bastante importante e encontra-se disponível na literatura (ASSIS, 2013). Ao custo de tornar este ensaio ainda mais longo, essa comparação nos permitiria compreender melhor os méritos e limitações da mecânica de Mach-Assis. Contudo, escolhemos nos limitar aqui à análise da teoria newtoniana por dois motivos: (1) porque Newton está muito mais presente que Einstein na física básica escolar e universitária; (2) porque essa comparação é suficiente para explicitar o arbitrário da teoria newtoniana, contribuindo para estabelecermos uma relação mais crítica com esta e outras teorias científicas hegemônicas.

Discussão e implicações

Mach e os livros didáticos

A partir de uma análise de livros didáticos, Assis e Zylbersztajn (2001) perceberam que as críticas de Mach, embora nem sempre sejam reconhecidas explicitamente, influenciaram vários autores de maneira sensível. Por exemplo, a definição newtoniana de massa inercial (produto da densidade pelo volume) e a referência ao espaço absoluto são sistematicamente evitadas. Porém, os autores de livros didáticos não chegam a abandonar completamente a necessidade de distinguir entre movimentos relativos absolutos, referenciais inerciais e não-inerciais, insistindo que forças inerciais são fictícias. Essa questão pode ser ilustrada pelo livro de Máximo e Alvarenga (2010), que, após insistir bastante com o leitor que a força centrífuga deve ser considerada uma concepção equivocada e irreal, afirma:

É possível identificar a força centrífuga em situações muito específicas. Ela aparece quando analisamos um sistema não em um referencial inercial, mas em um referencial que sofre uma aceleração centrípeta. Por exemplo, quando você está dentro de um carro que faz uma curva acentuada, você se sente jogado para fora, como se existisse uma força empurrando seu corpo. No referencial inercial do solo, essa força não existe. Porém, no referencial dentro do carro, no qual você está, é possível sentir essa força, mas, na verdade, é somente efeito de inércia da tendência que o seu corpo tem de manter o seu movimento em linha reta, sem fazer a curva (MÁXIMO; ALVARENGA, 2010, p.170).

A questão da definição dos referenciais é crucial na mecânica newtoniana. Dependendo do referencial a partir do qual observamos um fenômeno, ele pode se mostrar completamente diferente. Como as leis de Newton não se sustentam identicamente em todos os referenciais, é muito importante definir o conjunto de sistemas de referência para os quais essas leis podem ser afirmadas¹⁰. Como já foi antecipado, Newton “resolveu” o problema da definição dos referenciais inerciais argumentando a existência do espaço absoluto com base no experimento do balde. Os referenciais inerciais seriam aqueles que trasladam com velocidade constante e sem girar em relação a esse espaço. Contudo, os newtonianos de hoje em dia, constrangidos em não recorrer explicitamente à ideia de espaço absoluto, precisam se contentar com a circularidade da definição dos referenciais inerciais a partir do princípio da inércia. Veja por exemplo a maneira como Halliday et al. (1996 p.82, destaques nossos) redefinem a primeira lei de Newton:

Considere um corpo sobre o qual não atue força resultante alguma. Se o corpo está em repouso, ele permanece em repouso. Se o corpo está

¹⁰ Não deve ser difícil perceber que essa necessidade newtoniana de definir os “sistemas de referência legítimos” dos fenômenos da natureza não ocorre na mecânica relacional. A razão é muito simples. Enquanto Newton avalia posição, velocidade e aceleração dos corpos sempre com respeito a um referencial, Assis (por Equação 1), propõe levar em consideração somente quantidades relativas aos corpos ponderáveis interagentes. Assim, independente de desejarmos observar o movimento de uma mala (no bagageiro de um carro) na perspectiva de um pedestre ou da ponta de um giroscópio de quatro eixos que gira enquanto o carro faz a curva, os valores de posição, velocidade e aceleração da mala com relação a cada um dos outros corpos do universo segundo a Equação 1 serão os mesmos. Portanto, a mecânica relacional dispensa explicitar o sistema de referência.

em movimento com velocidade constante, ele permanecerá assim indefinidamente. A primeira lei de Newton é de fato uma afirmação sobre referenciais, pois ela define os tipos de referenciais nos quais as leis da mecânica newtoniana são válidas. Desse ponto de vista, a primeira lei pode ser expressa como: se a força resultante sobre um corpo é nula, é possível encontrar referenciais nos quais aquele corpo não tenha aceleração.

Nesse fragmento, a circularidade está bastante clara: referenciais inerciais são os referenciais em que valem as leis de Newton e são, ao mesmo tempo, definidos por uma dessas leis. Dito em outras palavras, a definição de referenciais inerciais não soa muito diferente da seguinte tautologia: “a primeira lei de Newton vale onde ela vale”.

Não é difícil perceber que o entendimento de que a primeira lei de Newton foi enunciada com o propósito de definir referenciais inerciais é amplamente difundido na comunidade de ensino de Física. Com efeito, uma afirmação bastante recorrente entre os críticos de livros didáticos é que a primeira lei não é um caso particular da segunda justamente porque *define* referenciais inerciais (CABRAL, 1984). Contudo, se retornarmos ao texto do próprio Newton (1990), perceberemos uma dissonância fundamental: Newton não se preocupa em definir referenciais inerciais tal como os disseminadores contemporâneos da sua teoria; nem sugere que seu princípio da inércia seja fundamentalmente uma definição desses referenciais. A razão dessa dissonância não é difícil de perceber: uma vez aceito o espaço absoluto, a definição dos referenciais inerciais a partir da primeira lei torna-se dispensável. Portanto, podemos argumentar que o entendimento da primeira lei como definidora dos referenciais inerciais é ela mesma uma *recontextualização* da mecânica newtoniana que afasta o conceito de espaço absoluto (desgastado pelas várias críticas que recebeu ao longo da história), preservando outros compromissos filosóficos da teoria newtoniana.

Ainda que seja possível perceber que a configuração atual dos livros didáticos é devedora das críticas de Mach, percebe-se também que tais críticas não são efetivamente incorporadas nesses livros (mesmo porque incorporar as considerações de Mach à mecânica newtoniana exigiria produzir uma teoria radicalmente nova). Por exemplo, em oposição às idéias de Mach, preservam-se nos livros didáticos: (1) a distinção entre movimentos absolutos e relativos e (2) a ideia de que forças inerciais têm status ontológico diverso das forças de interação.

Um olhar de fora: A construção de uma posição crítica

É importante destacar que, apesar de todo o exposto aqui, não existe entre os autores que assinam o presente ensaio consenso definitivo de que a mecânica relacional seja preferível à mecânica newtoniana. De fato, seria profundamente contraditório com o propósito de plantar a noção de *arbitrário cultural* insistir na “defesa da fé” em qualquer teoria científica, dado que todas elas são construções culturais arbitrárias. Se este ensaio se debruça mais em criticar a mecânica de Newton que defendê-la, é porque os argumentos favoráveis a ela são bastante conhecidos e não precisam ser reproduzidos aqui.

Não é necessário tornar-se defensor da mecânica relacional para concordar que essa teoria planta uma controvérsia legítima em mecânica; que ela torna mais perceptível que a mecânica de Newton é um *arbitrário cultural*; e que ensinar somente a mecânica

newtoniana contribui para a consolidação de uma visão menos crítica da ciência, dissimulando suas controvérsias históricas importantes. A arbitrariedade da distinção entre movimentos relativos e absolutos, que está na base da caracterização das forças inerciais como forças fictícias, por exemplo, é claramente desvelada pelo argumento de Mach, representado na Figura 2. Como é possível perceber, a evidência empírica apresentada por Newton (o experimento do balde) da existência do espaço absoluto só se justifica se desconsiderarmos a hipótese de Mach¹¹. Podemos até professar (junto com a maioria dos autores de livros didáticos) que forças inerciais são efeitos fictícios que resultam de estarmos observando um fenômeno a partir de um referencial não-inercial. Contudo, em vista do argumento de Mach, é preciso reconhecer que essa crença é arbitrária e não há nenhuma evidência empírica ou argumento teórico universal que a justifique rigorosamente.

O que se advoga neste ensaio é a consolidação de posições mais críticas frente às hegemonias científicas e *o reconhecimento de que o status de uma teoria na comunidade não é independente das relações de força que se estabelecem no interior dessa comunidade*. Por mais que essas relações de força não sejam sempre explicitadas em teorias sobre a natureza do conhecimento científico, elas estão diariamente presentes na vida dos pesquisadores, por exemplo, quando investem esforços para publicar em periódicos com maior parâmetro de impacto ou buscam estabelecer parcerias com laboratórios e pesquisadores mais prestigiados¹².

O peso das relações de reconhecimento que se estabelecem no interior de uma comunidade é mais flagrante nos chamados “argumentos de autoridade”, que ocorrem, por exemplo, quando insistimos que uma asserção é verdadeira não tanto por haver evidência que a sustente, mas porque foi posta por Newton, Einstein, Feynmann ou, mais genericamente, pelo conjunto da “comunidade científica”. Esse recurso à força é flagrante, beirando um “argumento contra a pessoa”¹³, por exemplo, no desfecho da crítica que Escobar e Pleitez (2001, p.269, grifos nossos) dirigem à mecânica relacional de Mach-Assis:

Em geral, uma comunidade tem uma ou várias revistas nas quais publica assuntos de um interesse que serve para definir a comunidade. A maioria das referências usadas no livro MR (Mecânica relacional, 1998) estão em revistas onde não são usualmente encontrados trabalhos de ciência normal. Se alguém tem argumentos válidos de que [teorias hegemônicas] estão erradas, [...] deveria publicar em revistas como Physical Review Letters. De nada adianta argumentar que essas revistas não publicariam, que têm preconceitos, etc. Isso mostra que as pessoas que apoiam os pontos de vista da MR pertencem a uma comunidade marginal.

¹¹ Hipótese de que, girando o universo, a superfície da água no balde também deve se curvar.

¹² Para Bourdieu (2004) a estrutura social de um campo científico é determinada fundamentalmente pelo acúmulo e distribuição desigual dos atos de *conhecimento e reconhecimento* entre os agentes desse campo. Por exemplo, um cientista que acumula mais conhecimento e é mais reconhecido pelos seus pares neste ou naquele domínio tem maior chance de ter sua produção intelectual reconhecida.

¹³ O argumento contra a pessoa é um tipo de argumento que conclui ser um enunciado falso porque ele é feito por determinada pessoa (SALMON, 1993, p. 52).

Esse fragmento pertence a uma resenha que tenta estabelecer, por definitivo, que a mecânica relacional está *errada* (ESCOBAR; PLEITEZ, 2001). Do transcrito, percebe-se o argumento de autoridade na medida em que a marginalidade de Assis e seus apoiadores é explicitamente considerada como razão para que sua teoria não seja creditada. Com efeito, avaliações do status científico dos pesquisadores e dos periódicos em que publicam são tão frequentes na vida diária de uma comunidade de pesquisa que é muito difícil sustentar que cumprem um papel realmente secundário frente a testes experimentais e análises teóricas e lógicas.

Em outra passagem, Escobar e Pleitez (2001) fornecem exemplo bastante ilustrativo de quanto o conceito de *arbitrário cultural* pode ser instrumental para pensar nossas relações com as teorias científicas mais hegemônicas:

Por que usar uma lei da gravitação baseada numa lei da eletrostática [de Weber] que não deu certo? Mesmo alguém que acredite na MR deve perguntar-se: por que essa força e não outra? Assim, existiriam tantas MR quanto possíveis autores. [...] Compare com o postulado de Einstein: 'a luz, no espaço vazio, se propaga sempre com uma velocidade determinada, independente do estado de movimento da fonte luminosa'. Na melhor das hipóteses, em 1905 estes dois postulados poderiam ter sido considerados como alternativas possíveis. Hoje, depois de tantos testes experimentais e teóricos, não mais (Escobar; Pleitez, 2001, p.266, grifos nossos).

O fragmento acima ilustra como a apreensão do arbitrário de um sistema simbólico com o qual nos identificamos depende de um *exercício de distanciamento* que só pode ser atingindo *na medida em que conseguimos perceber o referido sistema a partir de outro arbitrário*: os autores da resenha são capazes de perceber que a mecânica de Mach-Assis é uma versão dentre várias possíveis, mas não conseguem ter a mesma percepção da escolha operada por Einstein sobre os postulados fundadores da teoria da relatividade. Não seriam essas também escolhas arbitrárias (ainda que não aleatórias)? Não haveria tantas teorias da relatividade quantos einsteins? Teria fundamentação lógica (ou seria sustentada por um princípio universal) essa crença expressa pelos autores de que uma grande quantidade de evidência experimental seria suficiente para estabelecer com segurança e definitivamente qualquer afirmação teórica¹⁴ (no caso, os postulados da relatividade)?

O último fragmento ilustra que, mesmo podendo haver razões propriamente científicas para a manutenção da hegemonia desta ou daquela teoria em ciência, a escolha curricular de um ensino concentrado em inculcar as teorias hegemônicas resulta em uma apreensão menos crítica dessas teorias. A mecânica relacional está certamente repleta de problemas (a considerar pelo número incomparavelmente menor de pesquisadores que têm trabalhado em seu desenvolvimento), mas é justamente quando lhe damos voz que somos mais capazes de perceber criticamente os fundamentos da teoria newtoniana.

¹⁴ “Contudo, Einstein jamais chegou a acreditar que sua teoria fosse verdadeira. Chocou Cornelius Lanczos, em 1922, ao dizer que sua teoria não era mais que um estágio passageiro: chamou-lhe ‘efêmera’” (POPPER, 1976, p.112). Também “buscou uma melhor aproximação da verdade durante quase quarenta anos, até a sua morte” (POPPER, 1987, p.58).

Será a objetividade científica um obstáculo à crítica sociológica?

Há alguns obstáculos importantes de se considerar quando da introdução de referenciais da sociologia na área de ensino de ciências. Dentre esses obstáculos, visto que pesquisadores em educação científica em todo o mundo são frequentemente mais versados em autores canônicos da filosofia (LEMKE, 2001), destaca-se a expectativa de que a sociologia deva dar respostas aos debates já plantados nesse campo (por exemplo, o da *objetividade científica*). De fato, um projeto tradicional em filosofia da ciência é o de prescrever “boas práticas” científicas, esboçar critérios gerais capazes de realizar a demarcação entre ciência e não-ciência e explicar por que a ciência se desenvolve como tal¹⁵. Nisso tudo, a objetividade científica cumpre papel importante. Afinal, por que a ciência permitiu desenvolver tecnologias tão impressionantes quanto caravelas, máquinas-a-vapor e bombas de destruição em massa enquanto a religião está cada vez mais restrita ao domínio da moral e dos costumes? As ciências fatuais (sobretudo as da natureza) são atividades humanas extremamente bem sucedidas no que se propõem e talvez seja também por isso que nós, professores de ciências, estejamos sempre tão comprometidos em *justificar* o sucesso da ciência, apontando suas vantagens sobre outras atividades humanas.

Em um primeiro sentido, a objetividade consiste em reconhecer a *existência de um objeto de estudo fora da subjetividade* do pesquisador. Em um segundo sentido, ela consiste em reconhecer que, dentro de certas regras metodológicas, *é possível conhecer esse objeto*. Tal como nas ciências da natureza, a mesma objetividade científica permeia toda a investigação em ciências sociais no sentido em que também nela é presumido um objeto e a capacidade de apreender esse objeto dentro de certos limites. Tal como ocorre com cientistas da natureza – que assumem a objetividade tacitamente, sem jamais teorizá-la em seus artigos – a objetividade científica é uma posição filosófica tão fundamental quanto implícita na obra de Bourdieu. Por exemplo, é bastante evidente que, quando ele faz afirmações sobre o sistema de classes, o sistema escolar, o campo científico, sua organização funcionamento e, até mesmo, sobre o arbitrário cultural, ele está falando de algo que ocorre *objetivamente* (que existe para além das percepções subjetivas). Contudo, ele não mergulha no debate filosófico da relação entre teoria e evidência empírica para justificar sua sociologia.

Enquanto *ciência fatural*, a sociologia se justifica numa base muito semelhante à das ciências da natureza. Por exemplo, o conjunto da produção em ciências sociais também é orientado por teorias consideradas bem sucedidas e, no debate sociológico, a evidência empírica cumpre um papel decisivo. No entanto, em comparação com alguns dos filósofos mais populares no ensino de ciências, a sociologia tende a se afastar bastante da justificação científica. Essa orientação profundamente crítica da sociologia à ciência (que nunca deixa de ser, para os sociólogos, uma forma de autocrítica) representa um obstáculo importante na incorporação de referenciais da sociologia à pesquisa em educação científica justamente porque, sem relativismos subjetivistas, nos estimula a olhar com desconfiança para os discursos de justificação da ciência,

¹⁵ Vide, por exemplo, o método científico prescrito por Bunge (2005), o critério de demarcação de Popper (2002), segundo o qual a ciência se distingue por ser refutável, e a teoria de Lakatos, que aborda eventuais revoluções científicas como parte de um processo racional no qual a comunidade avalia o sucesso de teorias concorrentes a partir do seu sucesso empírico.

identificando que todos os campos da atividade humana (ciências da natureza, ciências sociais, arte e religião) têm suas próprias práticas de justificação.

Não é incorreto dizer que uma das contradições que movem os debates sobre visões de ciência até hoje nasce de um conflito de propósitos: o primeiro, retratar a ciência como atividade fundamentalmente objetiva e justificada empiricamente; o segundo, tratá-la como uma construção social humana a partir de razões que nunca se justificam completamente. Essa contradição chega a ser tão intensa que, quando afirmamos uma coisa, nosso ouvinte eventualmente considera legítimo supor que estamos negando a outra. Ou seja, quando afirmamos que a ciência é uma construção cultural arbitrária, nosso leitor poderá supor (equivocadamente) que estamos negando que a realidade ela mesma se imponha sobremaneira à ciência, restringindo o que podemos afirmar sobre o mundo¹⁶.

Em contraposição a essa tensão aparente entre o social e o objetivo, no chão dos laboratórios, essas duas dimensões da ciência são inseparáveis. Considere, por exemplo, a maneira contemporânea mais consagrada de avaliarmos a qualidade da produção científica de periódicos e pesquisadores a partir de parâmetros de impacto e número de citações. Rigorosamente, parâmetros de impacto e número de citações não são medidas da objetividade dos trabalhos científicos. São objetivamente *medidas sociais de prestígio e poder científico*. Ter bons índices “cientométricos” é, ao mesmo tempo, causa e resultado de uma maior capacidade de influenciar os rumos da ciência¹⁷. *Adotar medidas de prestígio como medidas de cientificidade indica que questões sociais são tão inseparáveis em ciência que a qualidade científica é frequentemente inferida a partir de indicadores sociais de prestígio e poder científico*. Um cientista real precisa ser tão competente em avaliar (ainda que intuitivamente) as relações de força do campo científico quanto em observar a correção empírica e teórica de seus trabalhos. É só para os comprometidos *a qualquer custo* com a justificação científica que a afirmação da importância de certas relações de força representa uma ameaça à ideia de que a ciência é fatural e avança com criatividade dentro dos limites da realidade. Quanto a Bourdieu, é justamente porque ele não se ocupou de teorizar a objetividade científica (à maneira de Popper, Lakatos e Bunge, por exemplo) que sua visão de ciência nos move a adotar uma posição crítica sobre qualquer teoria científica – até mesmo as mais hegemônicas.

Conclusão

Se, por um lado, referenciais da sociologia têm ganhado mais espaço na pesquisa em educação científica, por outro, é usual que cientistas da natureza resistam em reconhecer a relevância da sociologia da educação para o ensino de ciências. Os argumentos evocados para justificar essa resistência são muito variados, mas geralmente envolvem a queixa de que investigações sob esse tipo de abordagem não

¹⁶ Não perdemos em lembrar que a introdução do conceito de arbitrário cultural não implica afirmar que, em outra sociedade, a lei da gravitação será do tipo inverso do cubo da distância e, noutra, inverso da quarta potência...

¹⁷ Para explicar o papel do prestígio no campo científico, Bourdieu (2004) propõe uma analogia planetária bastante simples em que cientistas mais prestigiados seriam como corpos tremendamente mais massivos e, portanto, mais capazes de interferir na trajetória de corpos distantes. De fato, enquanto a produção de alguns cientistas fica mais ou menos restrita à sua própria instituição ou ao seu país, há aqueles que conseguem se fazer ouvir em escala mundial.

tomam conteúdos científicos como elementos fundamentais, comprometem a objetividade científica e não apresentam implicações claras para o ensino de ciências. Como é possível perceber, ao longo deste ensaio, abordamos e questionamos essas três razões típicas de resistência.

Evidentemente, o conceito de arbitrário cultural não é mais que o ponto de partida da sociologia de Bourdieu. Há ainda muitas contribuições de sua obra que podem iluminar a pesquisa em educação científica e o ensino de ciências. Na mesma medida, o próprio debate sobre a apropriação da sociologia pela pesquisa em educação científica não poderia acabar neste ensaio.

Aqui, argumentamos a relevância do conceito de *arbitrário cultural* de Bourdieu no contexto da controvérsia histórica em torno do status ontológico das forças inerciais com implicações para o ensino de Física. A análise realizada aqui permitiu ilustrar que: (1) mesmo as teorias científicas mais hegemônicas têm, em seu interior, elementos que resultam das escolhas arbitrárias (mas não-aleatórias) dos seus autores; (2) é justamente em vista desses elementos arbitrários que os cientistas precisam recorrer às relações de força do campo científico para impor suas teorias, dissimulando o que elas têm de arbitrário; (3) para perceber o arbitrário de uma teoria científica é preciso observá-la a partir de outro arbitrário.

Ao longo da análise, buscou-se explicitar a maneira com que a mecânica relacional de Mach-Assis permite perceber o arbitrário da mecânica newtoniana. Nesse sentido, deu-se particular atenção à crítica de Mach sobre o experimento do balde de Newton, destacando que a mesma crítica pode ser estendida a outros experimentos (como o pêndulo de Foucault) que também poderiam ser evocados em favor da existência do espaço absoluto (ou de movimentos absolutos).

Advogou-se aqui a importância de introduzir – com sensibilidade e sensatez – elementos de mecânica relacional no ensino de mecânica newtoniana com o propósito de sinalizar para os estudantes a possibilidade de uma apreensão mais crítica da teoria newtoniana, em particular, e da ciência, em geral. Na prática, essa inserção pode começar a ser pensada problematizando as discussões já realizadas sobre o status ontológico das forças inerciais (MÁXIMO; ALVARENGA, 2010, p.81-82). Algum esforço nesse sentido, ainda que muito incipiente, encontra-se em Gaspar (2011, pp.210-211).

Evidentemente, não consideramos importante a introdução da mecânica relacional por razões intrínsecas a essa teoria. Se nos limitamos a apontar aqui as vantagens da mecânica relacional sobre a newtoniana é porque os sucessos da mecânica newtoniana já são bem conhecidos. Principalmente, não sustentamos que a mecânica relacional deva substituir a hegemonia newtoniana. Muito pelo contrário, esperamos que, apresentadas juntas, elas sirvam como meio para que os alunos aprendam logo que, em ciência, muitas afirmações debatíveis passam despercebidas justamente porque nossa avaliação científica incorpora tacitamente algumas das relações de prestígio e poder que se estabelecem dentro da comunidade científica.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- ASSIS, A.K.T. On Mach's principle. **Foundations of Physics Letters**, vol.2, p.301-318, 1989.
- _____. **Eletrodinâmica de Weber**: Teoria, aplicações e exercícios. Campinas: Unicamp, 1995.
- _____. **Mecânica relacional e implementação do princípio de Mach com a força de Weber gravitacional**. Montreal: Apeiron, 2013.
- ASSIS, A.K.T.; GRANEAU, P. The reality of newtonian forces of inertia. **Hadronic Journal**, vol.18, p.271-289, 1995.
- ASSIS, A.K.T.; PESSOA JUNIOR, O. Erwin Schrödinger e o princípio de Mach. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, vol.11, n.2, p.131-152, 2001.
- ASSIS, A.K.T.; ZYLBERSZTAJN, A. The influence of Ernst Mach in the teaching of mechanics. **Science and Education**, vol.10, p.137-144, 2001.
- BOURDIEU, P. **Os usos sociais da ciência**: Por uma sociologia clínica do campo científico. São Paulo: UNESP, 2004.
- BOURDIEU, P.; PASSERON, J.C. **A reprodução**: Elementos para uma teoria do sistema de ensino. 2.ed. Petrópolis: Vozes, 2009.
- BUNGE, M. **La ciencia, su método e su filosofía**. Barcelona: Random House, 2005.
- CABRAL, F. A primeira lei de Newton é um caso particular da segunda lei. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, vol.1, n.1, p.4-7, 1984.
- CARTER, L. Sociocultural influences of science education: Inovation for contemporary times. **Science Education**, vol.92, n.1, p.165-181, 2008.
- EINSTEIN, A.; INFELD, L. **A evolução da física**. Rio de Janeiro: Zahar, 1966.
- ESCOBAR, O.; PLEITEZ, V. Mecânica relacional: A propósito de uma resenha. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol.23, n.3, p.260-270, 2001.
- GASPAR, A. **Física**: Volume único. São Paulo: Ática, 2011.
- GOLDSTEIN, H. **Classical mechanics**. 2.ed. London: Addison-Wesley, 1980.
- GRIFFITHS, D. J. **Introduction to Electrodynamics**. 3.ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**: Mecânica. 4.ed. São Paulo: LTC, 1996. Vol.1.
- KUHN, T. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo: Perspectiva, 1982.
- LAHIRE, B. **A cultura dos indivíduos**. Porto Alegre: Artmed, 2006.
- LAKATOS, I. **La metodología de los programas de investigación científica**. Madrid: Alianza, 1993.
- LALANDE, A. **Vocabulário técnico e crítico da filosofia**. São Paulo: Martins Fontes, 1993.
- LAUDAN, L. **El progreso y sus problemas**. Madrid: Encuentro, 1986.

- LEMKE, J. L. Articulating communities: Sociocultural perspectives on science education. **Journal of Research in Science Teaching**, vol.38, n.3, p.296-316, 2001.
- LIMA JUNIOR, P.; SILVEIRA, F.L.; OSTERMANN, F. A Física como arbitrário cultural: Uma reflexão a partir da sociologia do conhecimento de Pierre Bourdieu. In: Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física, IX, 2013, Águas de Lindóia. **Atas ...** p.1-8. Rio de Janeiro: ABRAPEC, 2013.
- LOSEE, J. **Introdução histórica à filosofia da ciência**. Belo Horizonte: Itatiaia, 1979.
- MACH, E. **The science of mechanics: A critical and historical account of its development**. La Salle: Open Court, 1960.
- MARION, J. B.; THORNTON, S. T. **Classical dynamics of particles and systems**. 4.ed. Fort Worth: Saunders College Publishing, 1995.
- MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. **Curso de Física**. São Paulo: Scipione, 2010. Vol.1
- NEWTON, I. **Principia: Princípios matemáticos de filosofia natural**. São Paulo: Nova Stella, 1990.
- NOGUEIRA, M.A.; NOGUEIRA, C.M.M. **Bourdieu e a educação**. Belo Horizonte: Autêntica, 2009.
- NOGUEIRA, M. A.; ROMANELLI, G.; ZAGO, N. **Família e escola**. Petrópolis: Vozes, 2011.
- OECD. **PISA 2006: Science competencies for tomorrow's world (executive summary)**. Paris: OECD, 2007.
- POINCARÉ, H. **Foundations of science: Science and hypothesis, the value of science and science and method**. New York: The science press, 1913.
- POPPER, K. A racionalidade das revoluções científicas. In: HARRÉ, R. **Problemas da revolução científica**. São Paulo: EDUSP, 1976.
- _____. **O realismo objectivo da ciência**. Lisboa: Dom Quixote, 1987.
- _____. **The logic of scientific discovery**. London: Routledge, 2002.
- SALMON, W. **Lógica**. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1993.
- THE TIMES HIGHER EDUCATION. **Most cited authors of books in the humanities**, 2009. Disponível em: <<http://www.timeshighereducation.co.uk/405956.article>>. Acesso em: 26 jul. 2013.
- ZYLBERSZTAJN, A.; ASSIS, A.K.T. Sobre a possível realidade das forças fictícias: Uma visão relacional da mecânica. **Acta Scientiarum**, vol.21, p.817-822, 1999.

Submetido em junho de 2012, aceito para publicação em março de 2014.