

# O método analítico de construções de explicações mecânicas e suas consequências epistemológicas e metodológicas: o pragmatismo de Poincaré e a partícula de Deus versus o Racionalismo de Duhem

*The analytical method for the building up of mechanical explanations and its epistemological and methodological consequences: Poincaré's pragmatism and God's particle vs. Duhem's rationalism*

**José R.N. Chiappin**

Departamento de Economia-FEA-USP – Brasil  
chiappin@usp.br

**Resumo:** O artigo foca sobre o exame do método analítico, que substitui o método sintético, de elaborar explicações dos fenômenos físicos. O método analítico substitui a construção de modelos mecânicos concretos por representações matemáticas. A tese da identificação do método analítico com uma teoria da matéria, que consiste na adição desta às representações matemáticas, produz profundos conflitos epistemológicos e metodológicos entre concepções da física, e, por aqui, de ciência. O principal conflito é entre o pragmatismo de Poincaré e o realismo estrutural de Duhem. O conflito relaciona-se com a adesão do primeiro à tese da identificação, fazendo surgir o problema de uma inevitável regressão infinita por novos fundamentos da matéria, e, do segundo, com uma interpretação da mecânica como linguagem. Forma-se um ambiente apropriado para uma reflexão sobre o problema da física atual com sua busca incessante por novas partículas, como a da partícula de Deus (Bóson de Higgs).

**Palavras-chave:** Poincaré. Pragmatismo. Mecânica analítica. Testabilidade empírica. Falseabilidade. Duhem.

**Abstract:** *The article focuses on the analysis of the analytical method, which replaces the synthetic method, to build up mechanical explanations of physical phenomena. The analytical method replaces the construction of mechanical concrete models with mathematical representations. The thesis of the identification of the analytical method, which consists in the addition of a matter theory to mathematical representations, raises epistemological and methodological conflicts among theoretical conceptions of science, such as those of the pragmatist conception of Poincaré and the structural realism of Duhem. The conflict is related to the defense by Poincaré of the identification thesis with its unavoidable problem of the infinity regress, and, the defense of Duhem of the analytical method as a language. This debate creates an appropriate environment for reflecting upon the problem*

*of contemporary physics with its incessant search for new particles such as God's particle (Higgs Boson).*

**Keywords:** *Poincaré. Pragmatism. Analytical mechanics. Empirical testability. Falseability. Dubem.*

## Introdução

O foco do artigo é examinar a aplicação do método analítico na construção de teorias físicas, denominado formulação lagrangeana/hamiltoniana, com a tese da identificação desse método com uma interpretação mecânica dos fenômenos físicos e suas consequências metodológicas e epistemológicas. Em tempos da partícula de Deus (Bóson de Higgs), o debate e a reflexão de Duhem e Poincaré sobre métodos de construção de teorias físicas podem ser oportunos para pensar as tendências da física e suas consequências. Tal reflexão e suas consequências metodológicas e epistemológicas estão fortemente relacionadas, por um lado, a uma crescente matematização da ciência, com ênfase em princípios de máximo e mínimo, que atingiu primeiro a física mecânica e que agora invade os domínios das ciências humanas, particularmente, a economia; e, por outro, a uma demanda por explicações materiais microscópicas da realidade, com a construção de mecanismos, com consequências de uma regressão infinita.

Do ponto de vista de Duhem, há dois modos de construir teorias físicas, particularmente teorias mecânicas, que, durante muito tempo, se confundiram com a própria teoria física. Na emergência da ciência moderna, com Galileu e Descartes, o princípio da unificação da física e o princípio da unificação da física pela mecânica eram uma e mesma coisa. Essa abordagem mecanicista consolidou, como quer Duhem (1980), dois métodos de construção das teorias físicas: o método sintético e o método analítico.

O método sintético consiste em explicar os fenômenos físicos por meio da construção de modelos mecânicos, que são mecanismos formados de modelos concretos de massas em movimentos, dos fenômenos físicos. O método analítico está voltado para uma abordagem mais abstrata, na forma axiomática, em geral com apelo a princípios de máximo e mínimo, como, por exemplo, o princípio da ação mínima, formulada de modo rigoroso por meio de conceitos e proposições seguindo estritamente o protocolo do modelo geométrico.

Já tratamos da abordagem sintética de explicar mecanicamente os fenômenos físicos e dos problemas e consequências metodológicas e epistemológicas associadas, em outro lugar (CHIAPPIN, 2013). A outra abordagem, *supra dixit*, é efetuada através da abordagem analítica (DUHEM, 1980) e é o tema deste trabalho, por suas importantes consequências metodológicas e epistemológicas, sobretudo a fonte e o suporte científico para a concepção pragmatista/convencionalista/instrumentalista da ciência, que tem em Poincaré e Maxwell seus principais doutrinadores.

A mais nova tentativa de explicar mecanicamente os fenômenos físicos foi elaborada pela escola inglesa, com Maxwell, quando as dificuldades sobre a aplicação do método sintético na construção de explicações mecânicas começaram a surgir. Maxwell, que extensivamente fez uso do método sintético de explicar mecanicamente os fenômenos físicos, pela construção de modelos concretos, estava

muito descontente com os resultados de sua muitas tentativas de proporcionar tais formas de explicações mecânicas.

Duhem e Poincaré se unem, ao indicar que as formas complexas e bizarras assumidas pelos modelos concretos mecânicos, decorrentes das exigências da abordagem sintética, constituem algumas das razões de Maxwell para semelhante descontentamento. Poincaré afirma que “[...] a estranheza e complicação das hipóteses que ele [Maxwell] foi compelido a formular, levaram-no a abandoná-las” (POINCARÉ, 1901, p. ix). Duhem também se manifesta sobre a insatisfação de Maxwell quanto ao método sintético:

Sem dúvida, portanto, Maxwell encontrou pouca satisfação no mecanismo que havia pensado, pois em pouco tempo ele abandonou para empreender um caminho completamente distinto em direção à explicação mecânica dos fenômenos elétricos. (DUHEM, 1980, p. 69).

Poincaré, contudo, parece não se preocupar muito com as dificuldades, provenientes dos diversos modelos concretos desse método sintético, uma vez que já tinha motivos para duvidar da importância do princípio clássico da unidade lógica da organização da física, além de não ter nenhum compromisso com a continuidade histórica da física. Poincaré era um físico e, enquanto tal, era radicalmente antimetafísico, de sorte que, para isso, se restringia a razões científicas. A principal razão científica para Poincaré desconsiderar as dificuldades relacionadas com a proliferação de modelos mecânicos é que via neles um forte papel heurístico. A variedade de modelos poderia ser inspiradora de novas ideias. Modelos diferentes, mesmo contraditórios, poderiam trazer novas ideias sobre diferentes aspectos do fenômeno.

Diferentemente de Poincaré, Duhem, ainda que também um físico, tem a física sob a perspectiva de sua história e de uma reflexão filosófica a propósito de seus métodos. Para Duhem, a concepção da ciência é normativa e, nesse contexto, ele faz sua adesão aos princípios clássicos tanto do princípio da unidade lógica da ciência quando da testabilidade empírica da ciência. Sob a ótica desses dois princípios, ele comanda a rejeição da aplicação do método sintético na construção de teorias. Uma nota importante é que a concepção normativa ou convencional da ciência por Duhem antecipa a concepção de Popper (1968). Com respeito ao método sintético, Duhem constata que ele tem ao seu lado a insatisfação da maioria dos físicos. Ressalta ele:

*Aos olhos da maioria dos físicos, o método sintético não mais parece capaz de proporcionar uma explicação mecânica e completa dos fenômenos naturais [...]. (DUHEM, 1980, p. 96).*

Maxwell tenciona evitar essas dificuldades e a repercussão associada ao uso de modelos mecânicos concretos, na explicação dos fenômenos físicos, no caso, fenômenos eletromagnéticos, que se manifestam como modelos bizarros e poucos elucidativos ou explicativos dos fenômenos físicos. Maxwell se propõe desenvolver um novo método mecanicista com uma abordagem mais abstrata, mais matemática, para construir teorias físicas e que, portanto, prescindia da necessidade de construir modelos mecânicos concretos.

Nessa época, final do século XIX e começo do século XX, a teoria mecânica já possuía tal método abstrato: a mecânica analítica/lagrangeana. Maxwell adota a mecânica analítica, em substituição à abordagem do método sintético, para explicar os fenômenos físicos, em particular, os fenômenos eletromagnéticos, originando uma nova concepção de explicação mecânica.

O emprego dessa abordagem da mecânica analítica (LANCZOS, 1970) para explicar os fenômenos físicos não apenas constitui uma nova versão do programa mecanicista, mas dá origem a uma nova maneira de formular as teorias físicas, mais abstratas, universais e, principalmente, mais racionais, no sentido de aumentar o procedimento algorítmico na construção da teoria (GOLDSTEIN, 1980).

As consequências epistemológicas e metodológicas desse método analítico são amplas e muito mais profundas e radicais que aquelas do método sintético, estando ligadas ao desenvolvimento e refinamento, por esses autores, de duas concepções da ciência conflitantes com respeito ao estatuto cognitivo da ciência, a saber, o pragmatismo/convencionalismo de Poincaré e o realismo estrutural e convergente de Duhem.

Do ponto de vista deste artigo, Poincaré desenvolve, a partir de sua interpretação do método analítico, mecânica analítica, de construção de teorias, os detalhes, quer metodológicos, quer epistemológicos, de sua concepção sobre a natureza da teoria física, a qual ele reduz a um valor meramente instrumental, suscitando uma visão pragmatista/convencionalista da mesma. No entanto, a interpretação da mecânica analítica por Poincaré não pode ser dissociada da circunstância de que ele identifica a mecânica analítica com uma teoria da matéria segundo a qual a natureza é formada de massas em movimento.

Duhem, por sua vez, rejeita essa identificação entre a mecânica analítica com uma teoria da matéria, enfatizando o aspecto matemático da mecânica analítica como fundada em princípios matemáticos, que pode ser aplicada a diversas áreas da física, como a termodinâmica, sem proporcionar interpretações mecânicas.

Além disso – e por causa disso –, ele pretende tornar ilegítima, numa concepção normativa da ciência, a generalização proposta pelo matemático francês das consequências de sua análise crítica desse método, no interior da teoria mecânica para a física em geral. Tal generalização se revelaria legítima, se a mecânica fosse a estrutura unificadora para toda a física, ou caso ela se encontrasse baseada em termos puramente matemáticos, porém, a interpretação mecânica está assentada fundamentalmente em uma teoria da matéria, e não nos princípios, que são puramente matemáticos, da mecânica analítica.

A emergência de novos domínios, de acordo com Duhem, como a termodinâmica e mesmo o eletromagnetismo, questiona a formulação unificadora pela mecânica quando associada a uma teoria da matéria, como quer Poincaré. A unificação da ciência, no entender de Duhem, deve abandonar a mecânica dependente de uma teoria da matéria e buscar representações dadas por princípios matemáticos, como princípios de máximos e mínimos da mínima, do qual o princípio da ação mínima é um exemplo.

Nesse contexto, Duhem questiona as propostas de interpretação pragmatista de Poincaré do estatuto cognitivo da física e dos testes empíricos das teorias físicas. Essas propostas epistemológicas e metodológicas encontram-se assentadas em estratégias apropriadas para as teorias mecânicas, as quais se valem de combinações

de massas em movimentos para explicar os fenômenos físicos e, por isso, não podem ser generalizadas para a física teórica (CHIAPPIN, 1989).

O ponto de vista de Duhem de teoria física é de ser ela uma física matemática em que as leis empíricas devem ser representadas por meio de princípios matemáticos. Essa física matemática se encontra bem ilustrada pelo método analítico de Lagrange de construir teorias, mas sem identificá-la com a teoria da matéria.

Adverte Duhem que esse ponto metodológico é muito importante e, desse modo, é preciso entender com clareza no que consiste esse método, dissociando-o dos compromissos e pressupostos, os quais envolvem compromissos ontológicos, com teorias da matéria.

A perspectiva metodológica de Maxwell acerca do programa mecanicista, em conformidade com muitos de seus contemporâneos, pressupõe, contudo, de maneira não crítica, uma tese generalizada sobre as relações entre a formulação lagrangeana da mecânica e a interpretação mecânica dos fenômenos físicos. Essa tese identifica o método analítico de Lagrange, conhecido como mecânica analítica, como fundada numa sintaxe dada pela construção de funções matemáticas que são funções de energia e princípios de minimização, e com uma semântica dada por uma interpretação mecânica via compromissos com teorias da matéria.

A identificação do método analítico de Lagrange com uma teoria da matéria constitui um princípio metodológico básico da abordagem analítica, na interpretação de Maxwell e outros físicos. A interpretação mecânica do método analítico requer uma teoria da matéria superposta às funções matemáticas de energia formuladas em termos de coordenadas generalizadas. Essa identificação do método analítico com uma teoria da matéria terá consequências relacionadas tanto com a testabilidade e avaliação das teorias mecânicas, com a regressão infinita nos fundamentos microscópicos da matéria, quanto, como consequência, com o estatuto cognitivo da teoria.

A adesão de Poincaré a essa tese da identificação é uma das fontes epistemológicas e metodológicas, juntamente com sua teoria dos sistemas dinâmicos, particularmente a teoria do caos, de sua concepção pragmatista/convencionalista da ciência e, portanto, da correspondente redução do valor da ciência a um valor apenas instrumental, e não de conhecimento.

Duhem inicia o exame crítico dessa abordagem da mecânica e da interpretação de Poincaré, questionando justamente tal identificação entre a teoria da matéria e o método de formulação de teorias físicas de Lagrange/Hamilton. Além disso, Duhem rejeita a teoria do caos de Poincaré como irracional (DUHEM, 1974), pois suas equações não levam vizinhanças em vizinhanças, sendo ela, por conseguinte, formulada em uma linguagem matemática, que não deve ser aceita como teoria física – e, aqui, temos os problemas de uma concepção normativa, que consiste em rejeitarem inovações com potencial heurístico por não satisfazerem seus cânones do que é ciência.

A tese de Duhem (CHIAPPIN, 1989) está em separar, diferentemente da tese de Poincaré e Maxwell, a estrutura matemática da mecânica analítica de Lagrange/Hamilton (GOLDSTEIN, 1980) de sua interpretação mecânica, que significa a tese da identificação, ou seja, apelar a modelos formados da combinação de massas em movimento para a construção de explicações mecânicas das leis empíricas.

Tanto Duhem quanto Poincaré entendem que os trabalhos de Maxwell mostraram que há uma interpretação mecânica, combinação de massas em

movimento, da função de Lagrange. Essa posição de Poincaré é sintetizada por Pareto, que comete o erro – assinalado por Duhem – de confundir teoria mecânica com teoria física, quando afirma:

*Os mesmos fatos podem ser explicados por uma infinidade de teorias, igualmente verdadeiras, porque todas reproduzem os fatos a serem explicados. É neste sentido que Poincaré pôde dizer que do fato mesmo de que um fenômeno admite uma explicação mecânica, ele admite uma infinidade delas [...]. (PARETO, 1909, p. 31-33 apud LATSIS, 1976, p. 9, [grifo nosso]).*

Assim, a análise de Poincaré da abordagem analítica de construção de teorias, como conduzida por Maxwell, leva-o a formular o princípio metodológico da subdeterminação da teoria pelos dados – PSTD (CHIAPPIN, 1989), o qual sustenta sua concepção pragmatista. Duhem adverte que são exatamente os trabalhos de Poincaré sobre a aplicação do método analítico por Maxwell na construção de sua teoria do eletromagnetismo uma das fontes de seu pragmatismo, acrescentando que ele está difundindo essa concepção na França. Ele salienta:

E não são esses prefácios retumbantes acerca dos trabalhos de Maxwell, feitos pelo distinto professor Poincaré da Sorbonne, aqueles que deram origem na França à crítica pragmatista da física, contra a qual M. Rey hoje protesta? (DUHEM, 1974, p. 319).

Tal crítica pragmatista é vista por Duhem como uma nova fonte de ceticismo (neoceticismo), que deve ser contida, uma vez que reduz a ciência a um valor instrumental e ameaça, segundo ele, a própria natureza da ciência, a qual é de proporcionar valor de conhecimento (DUHEM, 1908).

Duhem, dessa maneira, aponta que a concepção cética está relacionada às consequências metodológica e epistemológica da interpretação equivocada do método analítico, por associá-lo a uma teoria da matéria, da construção de teorias físicas.

A concepção pragmatista, difundida pela França sob a influência de Poincaré, forma o contexto da reflexão de Duhem sobre a relação entre a teoria mecânica e a teoria física, porque essa concepção rejeita os princípios clássicos da concepção de ciência, como o princípio da unidade lógica e o princípio da estabilidade empírica, que estão, por sua vez, ligados à tradição científica cartesiana. O pano de fundo do embate entre culturas não pode ser descartado, no caso, entre a francesa e a inglesa.

De qualquer forma, a análise crítica empreendida por Duhem ilumina, com efeito, o caráter geral e abstrato da formulação matemática da mecânica de Lagrange. Sua análise mostra que as aplicações da mecânica analítica não se limitam à teoria mecânica, pois, como destacou Maxwell, ela se ajusta muito bem para organizar sua teoria do eletromagnetismo e explicar as leis do eletromagnetismo, sem requerer qualquer interpretação mecânica.

Além desses dois domínios, Duhem defende a axiomatização da termodinâmica por Gibbs (DUHEM, 1886; 1894; 1907), exatamente por ser ela assentada no método do potencial termodinâmico, o qual corresponde à aplicação do método analítico de Lagrange à termodinâmica, sem ter que trazer com ela qualquer interpretação

mecânica da termodinâmica. Trata-se de algo que se transformou no programa de pesquisa de Boltzmann (BOLTZMANN, 1974; LARANJEIRAS; CHIAPPIN, 2006).

A axiomatização da termodinâmica conduzida por Gibbs é feita para substituir o uso do método dos ciclos termodinâmicos na organização e na aplicação da termodinâmica para solução de problemas. O método de ciclos termodinâmicos é o equivalente ao método sintético, na mecânica, ambos consistindo no uso de modelos concretos e contingentes como elementos da base teórica. Esses métodos impedem uma organização unitária das leis empíricas, restringindo-se a fornecer uma visão fragmentada do conhecimento.

O modelo de axiomatização da termodinâmica, elaborado por Gibbs, pelo método de Lagrange, é o ideal de Duhem sobre a física teórica. A abordagem da termodinâmica de Gibbs foi retomada por Callen (1960), na década de 1960, e se tornou a abordagem predominante, na área da física. Esse método caracteriza o ideal duhemiano de que a física matemática representa a construção de estruturas matemáticas formuladas por intermédio de princípios matemáticos aplicados à organização das leis empíricas, sem considerações à natureza da matéria. Tal é exatamente o problema com a interpretação de Poincaré do método analítico de Lagrange. Ele identifica o método analítico com a teoria da matéria, vinculando por esse meio uma interpretação mecânica caracterizada por fazer uso de modelos formados da combinação de massas em movimento.

Duhem aponta dois grandes problemas com a tese da identificação entre o método analítico e a teoria da matéria e o conseqüente uso da estratégia de construir a interpretação mecânica, através da construção de combinações de massas em movimento. O primeiro deles é o caráter não falseável das teorias físicas decorrente do recurso a essa estratégia. Como mencionado anteriormente, se se pode construir uma explicação mecânica na forma de combinações de massas em movimento, pode-se então construir infinitas.

A consequência metodológica dessa abordagem, com seus desdobramentos epistemológicos, é uma estratégia para evitar a falseabilidade das teorias físicas. Todavia, Poincaré não adere a esse princípio clássico como elemento demarcador de cientificidade. Há outros valores para definir uma teoria como científica, e a testabilidade empírica não parece ser um deles. Poincaré se envolve em várias discussões analíticas, nas quais refuta as pretensões de experimentos conclusivos em física.

Duhem pensa de modo diferente, pois tem os princípios da unidade lógica e da testabilidade empírica como elementos caracterizadores do que ele entende ser a natureza da ciência, além de estar comprometido com uma teoria da dinâmica do crescimento da ciência, a qual, para ele, deve ser racional e contínua. Há muitos elementos extralógicos, na concepção normativa de Duhem, para definir a natureza da ciência. Dessa forma, teorias que não são falseáveis não satisfazem a concepção de Duhem, quer do que vem a ser ciência, quer do seu desenvolvimento científico, que deve ser racional e contínuo.

Novamente, é importante ressaltar, sem se cansar de repetir, que Duhem antecipa, com a exigência da falseabilidade da mecânica, o critério de demarcação de Popper, que ele entende, como Popper também o fará, como normativo e convencional, portanto, metodológico – e não uma exigência científica. O debate metametodológico de Duhem e Poincaré antecipa o debate de Popper e os positivistas lógicos.

O segundo desses problemas ligado com a tese da identificação é aquele, como Duhem assinala, da regressão infinita para os fundamentos microscópicos da matéria. Nesse contexto, pode-se sustentar que a partícula de Deus (bóson de Higgs) não é o fim, mas apenas um estágio, porque a teoria da matéria é um compromisso ontológico de muitos físicos e que mantém uma visão mecânica do mundo.

## 1 Caracterização do método analítico

O elemento fundamental da abordagem analítica para a elaboração de explicações mecânicas é a mecânica analítica, nas formulações de Lagrange e Hertz. A formulação de Lagrange relaciona-se aos fundamentos da mecânica, de acordo com sua abordagem dinâmica (Newton), ao passo que a de Hertz se vincula à proposta cinética (Descartes).

Independentemente de suas formulações, a abordagem analítica do programa mecanicista tem por objetivo estabelecer as possíveis condições teóricas para explicar mecanicamente um fenômeno físico, o que significa, em termos específicos, satisfazer as equações de Euler-Lagrange, ao invés de construir efetivamente uma explicação mecânica, como seria o caso com a abordagem sintética, a qual demandava a construção de modelos concretos mecânicos.

As equações de Euler-Lagrange são consequências de princípios matemáticos, princípios de maximização e minimização, e funções de energia. Nesse sentido, a nova proposta busca, ao invés de construir, na linha do método sintético, um modelo mecânico concreto, como aqueles de *boney comb* ou de *idle wheel particles* propostos por Maxwell (DUHEM, 1980) para explicar correntes e campos, elaborar uma função algébrica das energias, por exemplo, para a energia cinética,  $T$ , e energia potencial,  $U$ , do sistema físico, de sorte a compor uma função  $L=T-U$ , que é a função de Lagrange de coordenadas generalizadas ( $q$ ), de suas derivadas ( $dq/dt$ ) e do tempo ( $t$ ). Dessa função, podem-se derivar matematicamente, por meio das equações diferenciais de Euler-Lagrange, as leis empíricas dos fenômenos físicos, que são descobertas através do método experimental.

Nesse contexto, pode-se pensar numa representação matemática, formada de funções de energia, formuladas em coordenadas generalizadas e suas derivadas, e princípios de máximos e mínimos das leis empíricas obtidas da experiência e sem qualquer referência à teoria da matéria.

As funções matemáticas de energia, a equação de Euler-Lagrange e as leis de transformação, as quais são envolvidas na abordagem analítica de Lagrange, permitem, porém, a elaboração de uma estratégia para defender uma interpretação mecânica unificada da física. O próprio Maxwell assume explicitamente o compromisso de aplicar essa abordagem à mecânica, em seu *A Treatise on Electricity and Magnetism* (MAXWELL, 1881; 1954). Ele desenvolveu esse método de construir uma interpretação mecânica associada à abordagem do método de Lagrange que Poincaré adotou, ampliou e divulgou.

No Apêndice II ao seu livro *Matter and Motion* (1920), Maxwell desenvolve, a partir do princípio da menor ação, todos os detalhes dos métodos de Lagrange e da Mecânica Analítica de Hamilton. Sobre sua concepção de que a ciência deve ser construída sob o menor número de princípios possíveis e que essa abordagem, adotada por ele, é proporcionada pelo método de Lagrange e pela Mecânica de

Hamilton, as quais podem ser deduzidas do princípio da menor ação, a seguinte passagem é bastante clara. Maxwell enfatiza:

The great desideratum for any Science is its reduction to the smallest number of dominating principles. This has been affected for dynamical Science mainly by Sir William Rowan Hamilton, of Dublin (1834-5), building on the analytical foundations provided by Lagrange in the formulation of Least Action in terms of the methods of his Calculus of Variations (1758), and later (1788) but less fundamentally for physical purposes on the principle of virtual work in the *Mécanique Analytique*. (MAXWELL, 1920, p. 145).

Mas, para além da aplicação do método de Lagrange na organização teórica do eletromagnetismo, Maxwell também deixa claro seu entendimento de que, uma vez uma área seja organizada teoricamente segundo essas abordagens proporcionada pelos métodos de Lagrange e de Hamilton, é possível construir uma interpretação mecânica relacionada à abordagem da mecânica analítica. É o que aparece no prefácio de seu *Treatise*:

In the following Treatise I propose to describe the most important of these phenomena, to shew how they may be subjected to measurement, and to trace the mathematical connexion of the quantities measured. Having thus obtained the data for a mathematical theory of electromagnetism, and having shewn how this theory may be applied to the calculation of phenomena, I shall endeavour to place in as clear a light as I can the relations between the mathematical form of this theory and that of the fundamental Science of Dynamics, in order that we may be in some degree prepared to determine the kind of dynamical phenomena among which we are to look for illustrations or explanations of the electromagnetic phenomena... [mais abaixo no prefácio]. Finally, some progress has been made in the reduction of electromagnetism to a dynamical Science, by shewing that no electromagnetic phenomenon is contradictory to the supposition that it depends on purely dynamical action. (MAXWELL, 1881, p. vi-vii; DUHEM, 1980, p. 69).

Essa passagem torna bastante evidente a existência, interpretada por Duhem, de dois objetivos para Maxwell: primeiro, aplicar a abordagem analítica, que trata das medições e relações matemáticas entre quantidades físicas; e, segundo, comprometer-se com o estabelecimento das conexões entre essa abordagem analítica e a explicação mecânica dos fenômenos físicos. Maxwell mostra-se plenamente comprometido com a tese da redução dos fenômenos físicos, pelo menos no que concerne ao eletromagnetismo, à mecânica, afirmando, na sentença final, que o fenômeno eletromagnético não é contraditório com a suposição de que ele depende de ações puramente mecânicas.

A tese de Duhem é, contudo, que os elementos básicos da metodologia da mecânica analítica de Lagrange e seu método de construção de teorias físicas

prescindem da interpretação mecânica, ou seja, de uma teoria da matéria. Ela é adicionada, por Maxwell, em uma segunda etapa, superposta, à abordagem analítica e externa a ela, como pode ser visto na passagem acima de Maxwell.

Na abordagem analítica, representa-se o estado de um sistema através de certo número de variáveis independentes (coordenadas generalizadas), por suas derivadas temporais, e pelo tempo. Pressupondo-se que as forças externas são nulas, elaboram-se três expressões matemáticas: a energia cinética ( $T$ ), a energia potencial ( $U$ ) e a  $L=T-U$ , formuladas em termos das coordenadas e suas derivadas, e do tempo. Aplicam-se as equações diferenciais de Euler-Lagrange da mecânica analítica à função  $L$ , conforme a fórmula abaixo (MAXWELL, 1920, p.153):

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

em que  $L=L(q, \dot{q}, t)$ , e,  $q_i, \dot{q}_i$  são as variáveis generalizadas, e,  $t$ , o tempo.

Essa equação de Euler-Lagrange pode ser obtida por diversos meios, entre eles o princípio da mínima ação, que consiste em  $\min_q \int L(q, \dot{q}, t) dt$ .

Com essa aplicação das equações diferenciais à função de Lagrange, pretende-se obter as leis empíricas dadas pelo método experimental. Nessa etapa, como as equações de Euler Lagrange foram obtidas por meio de princípios de otimização, considera-se que se tem, pois, uma explicação das leis empíricas, se se pode extraí-las de uma função de Lagrange. O elemento central é que as equações são resultados de princípios matemáticos, como o princípio de minimização, e da função de Lagrange, a qual está associada às funções de energia do sistema elaboradas em termos de coordenadas generalizadas e suas derivadas.

Maxwell vai mais longe, porém, do que essa interpretação matemática das leis empíricas. Ele assume que se pode construir a mesma função de Lagrange, a qual deu origem às leis empíricas, com o uso das equações de Euler-Lagrange, ou seja, as funções de energia,  $T$  e  $U$ , a partir de uma combinação de massas em movimento. Como o modelo formado de massas e velocidades envolve um grande número de parâmetros, é sempre possível, teoricamente, ajustar esses parâmetros, de tal modo a construir um modelo que tenha a mesma função  $L$ . E, nesse caso, pode-se afirmar que há uma explicação mecânica daquelas leis empíricas. A passagem seguinte mostra, como interpretada por Duhem, uma combinação dos dois propósitos de Maxwell, associada à aplicação do método analítico,

The ultimate aim of theoretical physical science is to reduce the laws of change in the physical world as far as possible to dynamical principles. It is not necessary to insist on the fundamental position which the kinetic potential and stationary property of its time-integral assume in this connexion. Two dynamical systems whose kinetic potentials have the same algebraic form are thoroughly correlative as regards their phenomena however different they may be in actuality. If any range of physical phenomena can be brought under such stationary variational form, its dynamical nature is suggested: there still remains the problem to extricate the

coordinates and velocities and moments, and to render their relations familiar by comparison with analogous systems that are more amenable to inspection and so better known. (MAXWELL, 1920, p.158).

Essa passagem resume bastante bem a combinação dos dois propósitos – aquele de organizar as leis empíricas segundo princípios matemáticos, como o princípio da menor ação, por meio do método analítico, e aquele outro, de estabelecer analogias pela construção das funções de energia que compõem a função de Lagrange, tanto para, no caso, os fenômenos eletromagnéticos, quanto por modelos formados da combinação de massas em movimento.

Poincaré interpreta as propostas de Maxwell com a aplicação do método de Lagrange que é sempre possível determinar, dado que se tem construído as funções energia  $T$ ,  $U$  e a função de Lagrange  $L=T-U$ , formuladas em termos de coordenadas generalizadas e suas derivadas,  $q_i, \dot{q}_i$  das quais se deduziram, através das equações de Euler-Lagrange, as leis empíricas obtidas experimentalmente, um conjunto de massas  $m_i$  (ocultas ou visíveis) e suas coordenadas  $(x_i, y_i, z_i)$  e derivadas, em que as primeiras são funções das coordenadas generalizadas, e do tempo (LEECH, 1971; GOLDSTEIN, 1980), definidas de tal modo que as energias cinética e potencial desse sistema de massas sejam iguais às energias cinética ( $T$ ) e potencial ( $U$ ) que aparecem nas equações de Lagrange. (POINCARÉ, 1901).

De acordo com Poincaré, a proposta de Maxwell, contudo, não teria por objetivo construir efetivamente, com modelos concretos, uma explicação mecânica dos fenômenos físicos. Antes, ela está voltada para estabelecer as condições necessárias e suficientes para tornar essa construção possível. Poincaré sintetiza, de maneira elegante, em sua análise do eletromagnetismo de Maxwell (POINCARÉ, 1901), tais condições, conforme o método analítico, para tornar os fenômenos físicos suscetíveis a uma explicação mecânica. Sua síntese, no entanto, acaba fornecendo uma definição da abordagem analítica. Ele afirma:

*É fácil compreender agora qual é a idéia fundamental de Maxwell. Para demonstrar a possibilidade de uma explicação mecânica da eletricidade, não temos que nos preocupar em encontrar esta explicação mesma, basta conhecer a expressão de duas funções,  $T$  e  $U$ , que são as duas partes da energia, formar com estas funções as equações de Lagrange e comparar, em seguida, estas equações com as leis experimentais. (POINCARÉ, 1901, p. viii, [grifo nosso]).*

Subjacente a essa definição da abordagem analítica, todavia, encontra-se o pressuposto relevante que é a superposição da tese da identificação entre abordagem analítica de Lagrange e uma teoria mecânica, por intermédio da tese da teoria da matéria. A tese da interpretação mecânica significa, no fundo, a tese da identificação da abordagem analítica com uma teoria da matéria. Isso representa a possibilidade de combinação de massas em movimento, ainda que não seja preciso construir efetivamente essa combinação.

A tese da identificação supostamente já garante a existência, ao menos teórica, de uma explicação mecânica das leis experimentais, a qual consiste em uma

combinação de massas em movimento, assim que se construa a função de Lagrange do sistema da qual as leis experimentais são deduzidas.

É graças a essa tese da identificação que Poincaré evidencia que a abordagem analítica do programa mecanicista colocou em evidência a seguinte, e *supra dixit*, regra metodológica: “[...] se um fenômeno possui uma explicação mecânica completa, ele terá uma infinidade de outras que proporcionarão uma descrição igualmente boa de todas as particularidades reveladas pelo experimento” (POINCARÉ, 1901, p. viii).

Se ambos os sistemas têm as mesmas funções das quais são deduzidas expressões idênticas às leis empíricas construídas pelo método experimental, de acordo com Maxwell, “[...] devemos ter provado que os fenômenos eletromagnéticos são passíveis de uma explicação mecânica” (DUHEM, 1980, p. 70).

Porém, tais condições constituiriam de fato uma prova de que os fenômenos físicos podem ser explicados mecanicamente? Essa é a questão de Duhem, para quem não há vínculo científico ou lógico entre a teoria da matéria e o método analítico de Lagrange, mas, apenas, metodológico.

## 2 A análise de Duhem sobre a abordagem analítica do mecanicismo e suas objeções

Dessa maneira, Duhem inicia sua crítica da abordagem analítica, questionando, *ut supra dixit* identificação da mecânica analítica com as explicações mecânicas, por meio de massas em movimento. Deve-se lembrar, entretanto, que essa abordagem analítica foi aplicada ao eletromagnetismo, por Maxwell, de modo a evitar as dificuldades, mencionadas anteriormente, da proposta sintética, provenientes da construção de modelos mecânicos concretos.

Tais dificuldades, ligadas à forma complexa e bizarra dos modelos mecânicos, resultam da exigência de que se formulem conjecturas acerca dos mecanismos particulares de massas em movimento subjacentes aos fenômenos físicos estudados. Nada similar, todavia, é encontrado na abordagem analítica: não há uma demanda pela construção de modelos mecânicos concretos, apenas construções de funções algébricas relacionadas às energias do sistema físico.

Assim, o objetivo na mecânica analítica consiste em construir as equações algébricas, formadas das energias cinética e potencial, do sistema físico, e aplicá-las às equações de Lagrange. Nessa construção, empregam-se as quantidades mensuráveis dos fenômenos físicos observáveis. Poincaré e Maxwell interpretam, no entanto, que o acordo entre as leis empíricas (descobertas através do método experimental) e as equações deduzidas por meio das equações diferenciais de Euler-Lagrange, da energia cinética e energia potencial e do trabalho virtual – construídas a partir dessas mesmas quantidades mensuráveis – garante uma explicação mecânica dos fenômenos. Eles assumem que, desde que essas condições sejam satisfeitas, pode-se construir, em princípio, um sistema mecânico que é a combinação de massas em movimento com as mesmas energias cinética e potencial, e, portanto, corresponde à mesma função de Lagrange, dos fenômenos físicos estudados.

Nesse sentido, no entender de Maxwell, justifica-se uma correspondência mecânica entre os dois conjuntos de quantidades envolvidas, a qual é justamente o modo como ele concebe a redução de teorias físicas à interpretação mecânica.

Essa redução é garantida, assim, por três suposições: a tese da equivalência, as equações de Lagrange e a construção da função de Lagrange, e o acordo entre

as leis, obtidas da dedução da função de Lagrange com a equação de Lagrange, e as leis empíricas.

Duhem questiona se a abordagem analítica oferece tal suporte para essa concepção de redução de teorias em mecânica. O erro significativo dessa abordagem, para Duhem, reside exatamente nessa identificação do método de Lagrange de formulação de teorias físicas com a interpretação mecânica.

Subjacente a essa crítica de Duhem, encontra-se sua visão de que a física teórica é uma estrutura matemática associada a uma interpretação física, a qual não precisa ser mecânica. Ele concebe a mecânica de Lagrange como um cálculo que pode ser interpretado e cuja estrutura matemática pode ser aplicada a diferentes domínios físicos.

Dessa forma, a sua primeira grande objeção à abordagem analítica está no fato de que a formulação de um problema físico em mecânica de Lagrange não constitui uma condição suficiente para garantir sua explicação mecânica. (DUHEM, 1980).

Duhem questiona a afirmação de que o estabelecimento de um uma função potencial, da energia cinética e do acordo das equações (obtidas através das equações de Lagrange) com as leis empíricas implique que os fenômenos físicos podem ser explicados mecanicamente. Dessa forma, concorda que sejam condições necessárias, mas discorda de que sejam suficientes, criticando, por conseguinte, a tese de que dessas condições se possa concluir, com certeza, que existe certo grupo de massas e forças – certo mecanismo –, admitindo tal potencial e, sobretudo, tal energia cinética (DUHEM, 1980).

Esse problema, a propósito da condição de suficiência, é por ele formulado através da seguinte questão: “[...] não poderia a forma destas últimas [as condições discutidas] excluir a possibilidade de tal mecanismo sob certas circunstâncias?” (DUHEM, 1980, p. 71). Uma evidência de que essas condições não são suficientes se fundamenta no fato de que explicações verdadeiramente mecânicas não foram encontradas. As que foram propostas deveriam ser interpretadas como ilustrações, que, no máximo, imitam ou simulam, em suas leis do movimento, as equações que se encontram em exame, não constituindo explicações mecânicas verdadeiras.

Duhem está sustentando, pois, que analogias não são deduções. São ilustrações e podem ter poder heurístico, mas não são deduções. Duhem chama a atenção para os trabalhos de Boltzman nessa linha, quando afirma:

Parece imprudente desconsiderar semelhantes dificuldades com uma penada. O que se descobriu, até o momento, como o melhor meio de eliminar objeções desta natureza *é imaginar mecanismos extremamente simples cuja energia interna, potencial e cinética, ofereça, em suas várias particularidades, uma analogia, mais ou menos direta, com a energia potencial e cinética que se pretende estudar; em uma palavra, trata-se de construir modelos que imitem, em suas leis do movimento, as equações discutidas.* Auxiliado pela teoria dos sistemas monocíclicos, Boltzmann ilustrou as concepções de Maxwell sobre a analogia entre as equações de Lagrange e as leis da eletrodinâmica com tais modelos. (DUHEM, 1980, p. 72, [grifo nosso]).

Duhem salienta, dessa maneira, a diferença entre uma explicação verdadeiramente mecânica, uma dedução matemática, que seria a verdadeira explicação causal dos fenômenos físicos, e as ilustrações mecânicas ou os modelos mecânicos, provenientes dos recursos de analogias, os quais são mecanismos com energia potencial e cinética similar àquela do sistema estudado. Eles são simulações dos fenômenos físicos, não explicações causais.

No entender de Duhem, Maxwell e aqueles que conformam a abordagem analítica, o método de Lagrange, à mecânica, juntamente com a tese da identificação, raciocinam em termos do modelo fundacionista de redução (Descartes), o qual assume que toda a regularidade dos fenômenos físicos é resultado de combinações de massas em movimento, embora a própria natureza da mecânica analítica com a equação de Euler-Lagrange proporcione algo distinto, uma relação matemática entre leis empíricas e princípios matemáticos. O isomorfismo das equações e das funções de ambos os domínios permite apenas e tão somente analogias, e nunca reduções fundacionistas.

Além disso, é importante também indicar que a concepção de Duhem acerca da generalidade do método de Lagrange, bem como a possibilidade de este ser estendido a outros domínios que não o mecânico, como, por exemplo, ocorrerá, mais tarde, na matematização da economia – foco de outro artigo –, se encontra na base de sua crítica da tese da identificação. Duhem nota que esse método se constitui por uma estrutura matemática que pode ser aplicada a diferentes domínios, envolvendo quantidades físicas e tipos de forças, em que o sistema generalizado de coordenadas recebe interpretações físicas distintas. Apenas em particular, há a interpretação mecânica.

O próprio Duhem aplica o formalismo de Lagrange, seguindo Gibbs, para tornar a termodinâmica um sistema axiomatizado, pela utilização de potenciais termodinâmicos, sem, entretanto, interpretar mecanicamente o fenômeno do calor. As condições para estender o método de Lagrange são o tema de seu artigo “Sur quelques extensions récentes de la statique et de la dynamique” (DUHEM, 1980, p. 130-157), como também sua preocupação na segunda parte de seu livro *A Evolução da Mecânica* (DUHEM, 1980, p. 105-189).

A proposta de teoria física de Duhem surge a partir de sua compreensão da generalidade da mecânica de Lagrange e de sua visão do desenvolvimento científico como a busca por teorias cada vez mais abstratas e mais abrangentes. Duhem parece apontar que esse processo de desenvolvimento por maior abstração e abrangência se pode observar na transição da mecânica vetorial de Newton para a mecânica de Lagrange e, na sequência, na transição para a representação na mecânica hamiltoniana.

Essa crítica da tese da identificação do método analítico com a interpretação mecânica, como *non sequitur*, todavia, não é a única objeção que ele formula. Como uma estratégia para desenvolver suas outras objeções, ele nos convida a deixar temporariamente de lado suas ressalvas e a assumir que as condições, previamente mencionadas, de fato constituem condições necessárias e suficientes para explicar os fenômenos físicos de maneira mecânica.

Assumamos, portanto, que um grupo de fenômenos é mecanicamente explicado, quando se aplica o método analítico, por conseguinte, que se encontram definidas uma energia potencial e uma energia cinética, e, desse modo, uma função de Lagrange, da qual possam ser obtidas, através das equações de Lagrange, equações que se ajustem às leis experimentais.

Há ainda, como apontado por Duhem, dificuldades metodológicas para o método analítico de construção de teorias, dado que se assume a tese da identificação com a interpretação mecânica. Duas dessas dificuldades são que o método leva à construção de teorias ou explicações físicas não falseáveis e, além disso, conduz as explicações mecanicistas a um processo de regressão infinita quanto aos novos fundamentos da matéria.

A emergência da abordagem analítica para a construção de teorias físicas trouxe a possibilidade de vir a ser um princípio unificador da física, dando origem à seguinte questão: “[...] poderão todas as leis físicas ser colocadas na forma das equações de Lagrange?” (DUHEM, 1980, p. 73); ou, ainda, na versão da tese da equivalência, poderá a abordagem analítica do programa mecanicista proporcionar os meios para realizar o objetivo de unificar o todo da física?

Há duas respostas para as questões acima. A primeira é apresentada por alguns físicos, como Poincaré,<sup>1</sup> afirmando de modo negativo, quando escreve: “Existe uma incompatibilidade radical entre a mecânica lagrangeana e as leis da física” (DUHEM, 1980, p. 73). Esses físicos salientam a dificuldade de reduzir a segunda lei da termodinâmica à mecânica (sendo este, assim, o caso para todos os fenômenos irreversíveis) como uma evidência para esse fato. Eles raciocinam que, se, por um lado, uma análise da mecânica de Lagrange mostra que “[...] todos os movimentos controlados pela dinâmica de D’Alembert e Lagrange são reversíveis”, por outro, os exemplos propiciados pelo método experimental e pelos fatos indicam que “[...] os movimentos naturais não são reversíveis” (DUHEM, 1980, p. 75), de sorte que há uma incompatibilidade evidente entre os fatos e a teoria mecânica. Como mencionado anteriormente, Maxwell não via contradição entre os fenômenos eletromagnéticos e a mecânica, e estava comprometido com sua redução.

O que se segue dessa incompatibilidade mencionada por Poincaré? Deve-se persistir em buscar, na teoria mecânica, a estrutura unificadora para a física e tentar modificar seus princípios básicos, tais como o princípio de D’Alembert? Segundo Poincaré, não há espaço para o princípio da unidade lógica na física, mas para a regra da subdeterminação da teoria pelos dados e, assim, para uma pluralidade de modelos.

No entanto, para Duhem, não devemos nos precipitar em tirar essas consequências metodológicas pragmatistas, já que uma análise lógica mais detalhada da abordagem analítica da teoria mecânica (que pressupõe a teoria da matéria) – por exemplo, aquela efetuada por Helmholtz – mostra não haver justificação possível para tal incompatibilidade entre a abordagem analítica e os movimentos naturais. Aqueles que adotam a tese da identificação do método analítico com a teoria da matéria não estão sendo consistentes em suas análises.

Duhem alerta, portanto, que uma incompatibilidade como essa é apenas aparente, do ponto de vista dos fundamentos da mecânica analítica, desde que se admita a tese da identificação e do uso de hipóteses acerca da natureza da matéria. Frisa Duhem:

---

1 Poincaré afirma que “[...] o mecanicismo é incompatível com o teorema de Clausius” (POINCARÉ, 1893, p. xviii).

Os movimentos observáveis não são os únicos movimentos que ativam os sistemas naturais; que, a estes movimentos, existem movimentos ocultos adicionais que escapam à nossa observação direta, isto apenas, de cujas divergências estes movimentos são a explicação, permite-nos compreender suas particularidades. (DUHEM, 1980, p. 78).

A arbitrariedade e a indeterminação desses mecanismos invisíveis de massas e movimentos ocultos tornam qualquer lei suscetível de explicação mecânica. Duhem, com efeito, novamente, afirma:

Qualquer que possa ser a forma das leis matemáticas com as quais a inferência experimental sujeita os fenômenos físicos, é sempre possível alegar que tais fenômenos são os efeitos dos movimentos, perceptíveis ou ocultos, sujeitos à dinâmica de Lagrange. (DUHEM, 1980, p. 78).

Essa indeterminação e arbitrariedade inerente ao método de construir combinações de massas em movimento possibilitam teoricamente encontrar e construir explicações mecânicas de quaisquer discrepâncias com os fatos empíricos. Assim, Duhem não deixa de enfatizar:

Uma vez que não se impõe qualquer condição, qualquer restrição, aos movimentos ocultos, com base em que poder-se-ia provar que dada discrepância não poderia encontrar sua justificação nos mesmos? (DUHEM, 1980, p. 77-78).

É esse apelo a uma teoria da matéria com seus mecanismos, massas invisíveis e velocidades repugnante a um físico? De forma alguma. É exatamente o que eles têm feito, e os exemplos na física são abundantes. Este é o caso nos trabalhos de Helmholtz, Boltzmann, Clausius e Maxwell. Helmholtz também empregou, como Maxwell, o programa mecanicista de acordo com o método analítico com a tese da identificação da teoria da matéria, em que a hipótese de um sistema de massas ocultas em movimento assume a forma de sistemas monocíclicos, gerados pelas equações de Lagrange, para construir ilustrações mecânicas, por exemplo, para a segunda lei da termodinâmica.

No entender de Duhem, o próprio Helmholtz ressalta que “[...] ele foi obrigado a assumir a existência de um grande número de massas não capturadas pelos sentidos, de movimentos invisíveis das mesmas, para explicar a existência de forças entre corpos não contíguos” (DUHEM, 1980, p. 87). O trabalho de Helmholtz foi a fonte para Boltzmann, Clausius e Gibbs.

Desse modo, para Duhem, físicos tais como Poincaré não são coerentes, pois interpretam (metodologicamente) de maneira incorreta haver uma incompatibilidade entre o mecanicismo e os fatos experimentais. A abordagem da mecânica analítica por eles utilizada não permite que se infira haver uma incompatibilidade possível entre esses dois domínios.

O método mecanicista, baseado na mecânica de Lagrange e na teoria da matéria com seu apelo à indeterminação e à arbitrariedade do sistema de massas

ocultas em movimento, não é de maneira alguma falseável, de sorte que não pode haver, segundo Duhem, outra conclusão e interpretação correta da aplicação da abordagem analítica da construção de teorias com a tese da identificação com a interpretação mecânica, por meio de massas em movimento, que aquela da compatibilidade entre o mecanicismo e os fatos experimentais.

Podem até ser que as leis experimentais não se ajustem imediatamente a uma forma similar à equação de Lagrange. Porém, no entender de Duhem, “[...] o método analítico não se tornará ineficiente por tudo isto” (DUHEM, 1980, p. 96-97). Por quê? Para apresentá-las na forma da equação de Lagrange, sempre podemos apelar, na concepção desses físicos mecanicistas, a hipóteses de um sistema abstrato e arbitrário de massas ocultas em movimento, cuja natureza não receberá a formulação de quaisquer conjecturas específicas. Esse sistema de massas indeterminadas em movimento pode ser arbitrariamente rearranjado, a fim de ajustar as leis físicas em uma forma similar às equações dinâmicas de Lagrange. Sobre isso, Duhem ressalta:

Para assimilar estas fórmulas às equações da dinâmica, assumir-se-á que o sistema encerra massas não detectadas e movimentos ocultos; além disto, como nada torna exata, nem limita a natureza, o número e a complexidade destas massas e movimentos, parece de fato que nenhum tipo de fórmula poderia ser considerado como irredutível às equações da dinâmica. (DUHEM, 1980, p. 97).

Duhem reitera que a principal consequência do emprego dessa tese da identificação entre método analítico e interpretação mecânica, com o uso dos modelos de massas em movimento, é o caráter não falseável das teorias mecânicas construídas pela abordagem analítica, atingindo a própria natureza da ciência, a sua estabilidade empírica.

Duhem tem como pressuposto que o critério de demarcação de ciência deve demandar a falseabilidade das teorias científicas, de sorte que procura preservar os princípios do método de Lagrange e redireciona as dificuldades e obstáculos formulados em oposição ao programa mecanicista para duas pressuposições do mesmo: a hipótese atomista da matéria e a exigência básica de que os conceitos físicos sejam reduzidos a um número restrito de magnitudes mecânicas primitivas, tais como massa, movimento, forma e/ou força.

O objetivo de unificar toda a física (o princípio da unidade lógica) pela abordagem analítica do programa mecanicista, com a base conceitual mecânica restrita (massa, movimento e forças), só pode ser realizado ao custo de ampla indeterminação de seus parâmetros de massas e movimentos, e é exatamente isso que tem acontecido. Tornou-se inevitável, como consequência de semelhante indeterminação e arbitrariedade envolvida nesse sistema de massas ocultas em movimento, a não falseabilidade das teorias mecânicas.

Na abordagem analítica com a tese da identificação, massa e movimentos são meros parâmetros em equações matemáticas, isentos das conotações realistas e figurativas que possuíam na abordagem sintética, que, diferentemente da analítica, envolve especificações e determinações das massas, movimentos, tamanhos e forças.

Todavia, por que Duhem considera o caráter não falseável do método mecanicista como um problema? E por que essa é uma fonte de sua crítica? Tal

abordagem da interpretação mecânica de massas em movimento não constituiria, afinal, uma abordagem heurísticamente legítima, fonte de novas ideias, como quer Poincaré?

Não devemos nos orgulhar de evitar toda contradição. Mas devemos tomar partido. Duas teorias contraditórias, com efeito, contanto que não as misturemos, e nem busquemos a essência das coisas, podem ambas ser instrumentos úteis de pesquisa. Talvez a leitura de Maxwell fosse menos sugestiva se ela não tivesse aberto tantos caminhos novos, divergentes. (POINCARÉ, *apud* DUHEM, 1974, p. 91).

Duhem não partilha da concepção de Poincaré de teoria física, ao contrário, elaborou todo um aparato epistemológico e metodológico para se opor à concepção pragmatista/convencionalista de Poincaré. (CHIAPPIN, 1989). Para começar, Duhem não pensa que o objetivo da física teórica, ou física matemática, consiste em promover a descoberta de novas leis. Essa é a tarefa da física experimental. Contudo, num primeiro nível, Duhem e Poincaré coincidem em entender que física teórica tem por objetivo representar matematicamente as leis empíricas.

Mas, para Duhem, há, além do enfoque estático da avaliação da teoria física, uma perspectiva dinâmica. Nessa perspectiva dinâmica da teoria física é onde residem as principais diferenças entre eles. Duhem está comprometido com a construção de uma teoria dinâmica do desenvolvimento científico como racional e continua convergindo para uma teoria ideal representante de um realismo estrutural organizando as leis empíricas. Essa concepção visa a recuperar o valor de conhecimento da teoria física que a concepção de Poincaré reduziu a valores instrumentais.

A concepção normativa de Duhem não concebe a aplicação, em teoria física, de hipóteses e métodos que constroem teorias físicas não falseáveis e, portanto, que não tornem o crescimento científico, racional e contínuo. (CHIAPPIN, 2014). Por essa razão, esses métodos ou estratégias envolvendo a construção de modelos como combinações de massas em movimento devem ser metodologicamente substituídos. Na opinião de Duhem, o problema de definir a natureza da ciência é uma questão de ordem normativa e não científica.

Assim, do seu ponto de vista, a concepção do que é ciência é convencional e não científica. Essa mesma abordagem do problema de circunscrever o que vem a ser ciência será adotada por Popper, mais tarde. Segundo Duhem, racionalidade pressupõe a possibilidade do controle dos passos e passagens, e a continuidade significa que as novas teorias devam abranger tudo o aquilo de que as teorias anteriores deram conta, agregando algo novo. Nada disso parece possível com o recurso da construção dos mecanismos de massas em movimento.

Duhem defende, relativamente a essas consequências do método mecanicista, que a termodinâmica construída por Gibbs, de modo axiomático, conforme o método de Lagrange, portanto, pelo uso de potências e princípios de otimização, seja o novo modelo de teoria física. Com base nesse novo modelo, Duhem substitui o método mecanicista pelo método da energética (CHIAPPIN, 1989).

A energética seria a nova teoria unificadora da física, sendo uma generalização da termodinâmica para aplicação a novos domínios. O método da energética

seria um método de construção de teorias físicas com regras para a formação de conceitos ou quantidades físicas, estabelecendo que a introdução dos mesmos deva ser controlada por condições de medição e não se reduza às magnitudes mecânicas. Os modelos mecânicos devem ser eliminados das teorias físicas.

Duhem, entretanto, não está sozinho em suas críticas ao método mecanicista; Kirchoff e Hertz expressam aquela mesma decepção de Maxwell com a abordagem sintética e suas construções bizarras. Rejeitam representações materiais e concretas, bem como o uso de modelos, tais como a mecânica física de Laplace e Poisson, os quais imaginam um modelo definido para unificar toda física, onde os corpos são um agregado de pontos materiais dotados de atração, coesão e poder de repulsão. No entanto, eles também criticam o programa analítico como conduzidos sob a formulação de Lagrange, porém, por razões distintas daquelas formuladas por Duhem.

Hertz não aceita o uso da noção de força em mecânica, que, no seu entender, é um conceito metafísico. Tal como Kirchoff, ele rejeita o dualismo material entre força e matéria, argumentando que a mecânica deve também eliminar o uso da força como uma suposta causa dos fenômenos. Em seu modo de ver, a mecânica deve empreender uma análise puramente descritiva e abstrata da matéria em movimento, tal como operada pela formulação de Lagrange.

Hertz busca construir uma mecânica abstrata para o programa cinético cartesiano, assim como Lagrange construiu uma para o programa dinâmico newtoniano. Equações diferenciais e pontos materiais abstratos devem ser os únicos elementos da mecânica.

Hertz levou o programa de Kirchoff, de banir a força do interior da mecânica, a suas últimas consequências, removendo por completo as forças reais de sua mecânica. Todas as forças são ficções. Os elementos nela remanescentes (em sua mecânica) são conceitos puramente formais de massa, movimento e forma. Desses conceitos formais, juntamente com os princípios da ação mínima e da conservação de energia, Hertz obteve as equações de movimento. Tais equações diferem daquelas de Lagrange, pelo fato de que nenhuma força real se encontra formulada.

Todavia, de acordo com Duhem, o emprego da mecânica hertziana para dar conta dos movimentos, que são usualmente explicados pelas equações da mesma forma, exceto por dependerem de forças reais, demanda que todas as forças, consideradas como reais pela formulação de Lagrange, sejam reduzidas a consequências de massas ocultas em movimento, e, assim, não difere das interpretações de Poincaré e Maxwell. Como destaca Duhem:

Manter-se-iam os termos que as representam, mas estes termos seriam considerados como expressando forças fictícias, forças inerciais geradas pelos movimentos ocultos ou forças constantes direcionadas para a presença de massas ocultas; em outras palavras, aplicar-se-ia, de uma maneira completamente geral, o processo empregado por Maxwell para dar conta das ações eletrodinâmicas. (DUHEM, 1980, p. 87).

Nesse sentido, segundo Duhem, a diferença entre as formulações de Lagrange e de Hertz da mecânica é redutível mais a uma distinção linguística do que a alguma característica essencial. Ele defende esse ponto de vista explicitamente:

Mas a diferença [entre os postulados dessas mecânicas] é de outro tipo, uma de linguagem, por assim dizer; a hipótese fundamental de Hertz e aquela que acabamos de formular são expressas exatamente através das mesmas equações. (DUHEM, 1980, p. 87, [grifo nosso]).

Como vimos, esses sistemas de massas ocultas em movimento são totalmente indeterminados e arbitrários, visto que nada limita a natureza e o número das mesmas; isso torna as teorias mecânicas não falseáveis. Consequentemente, as teorias físicas construídas pelo método mecanicista, conforme a mecânica de Hertz e de Lagrange, não se encontram sujeitas ao controle dos fatos empíricos, o que significa que, em ambas, a aplicação do princípio empirista da testabilidade das teorias físicas perde seu sentido com a adoção do método mecanicista para construí-las.

Saliento e destaco que, no entender de Duhem, um método racional para construir teorias físicas deve ter compromisso com a otimização da testabilidade empírica das mesmas, fazendo com que a falseabilidade seja possível. Essa posição é muito semelhante àquela da tese suprema de Popper de que devemos adotar apenas regras que aumentem a falseabilidade da teoria. Duhem se refere ao caráter não testável da mecânica de Hertz nas seguintes palavras:

A mecânica de Hertz, portanto, deixa completamente subdeterminados os movimentos e massas ocultos que devem explicar as forças da Natureza. Nestas condições, como se provaria que certa força não é explicada por estas massas e movimentos? Não se poderiam encontrar, por experimento, argumentos que poderiam convencer esta mecânica do erro acerca da crença que esta mantém. (DUHEM, 1980, p. 88).

Desse modo, do ponto de vista de Duhem, não faz diferença se a mecânica considera ou não a força como uma noção primária: o importante é que ambas não estão autorizadas a aceitar a tese da identificação da mecânica analítica e da teoria da matéria.

O aspecto importante dessa discussão sobre o método analítico consiste na consciência de Duhem acerca do caráter não falseável das teorias produzidas pela identificação do método mecânico com a teoria da matéria que faz uso de estratégias como o método de construção de mecanismos formados de massas em movimento.

Quando uma teoria [tal como a mecânica física] multiplica assim estratégias e chicanas para se defender, é inútil prosseguir com ela, pois se tornou elusiva; e seria fútil prender-se a ela, uma vez que, para toda mente que raciocina de forma correta, ela seria uma doutrina derrotada. Esta é a mecânica física. (DUHEM, 1980, p. 45).

Ela é uma doutrina derrotada, segundo Duhem, pois atinge a própria natureza da teoria física que está em sua testabilidade empírica e, portanto, na possibilidade de ser falseável. Que a origem dessa não falseabilidade reside justamente na

abordagem analítica do método mecanicista pode ser confirmada pelas análises que Poincaré faz de várias experiências em que busca rejeitar a pretensão de que o método experimental possa ser utilizado para proporcionar decisões conclusivas.

Duas dessas análises por Poincaré são a do experimento de Wiener e a do experimento de Gouy (POINCARÉ, 1891). Por conseguinte, Poincaré sentencia que o método experimental não pode nem verificar nem falsificar teorias físicas. Isto é, não há experimentos cruciais na física (POINCARÉ, 1891, p. 326-329; 1901, p. viii-ix; DUHEM, 1974, p. 216).

A dificuldade dessa posição de Poincaré, no entender de Duhem, está no fato de generalizar, para a física teórica, essa interpretação, via mecânica, do método experimental. Poincaré considera a aplicação de tais estratégias de se recorrer à combinação de massas microscópicas em movimento como constituindo uma regra metodológica válida para qualquer teoria física. Esta é uma das principais razões pelas quais Duhem critica Poincaré.

Duhem, por outro lado, defende a tese de que o método experimental pode rejeitar e refutar teorias físicas (bem construídas). Na defesa dessa tese, ele se propõe recusar o emprego de métodos e hipóteses que introduzam indeterminações e arbitrariedades nas mesmas.

Contudo, já que aceita essa identificação entre a abordagem analítica e a hipótese atomista, segue que se pode sempre proporcionar, como creem Maxwell e Duhem, a compatibilidade entre uma teoria mecânica e os fatos. Poincaré aponta que a termodinâmica pode ser um contraexemplo dessa tese da compatibilidade. Todavia, segundo Duhem, a decisão de usar os recursos do método de combinação de massas em movimento com grande número de graus de liberdade não permite essa incompatibilidade entre a teoria mecânica e os fatos. De acordo com ele, tantos são os parâmetros envolvidos nessa estratégia das massas em movimentos que é sempre possível ajustar esses parâmetros, de tal modo a dar conta dos fatos. O método da combinação de massas em movimento, dessa forma, inviabiliza o teste empírico das teorias e explicações físicas, tornando as teorias não falseáveis.

O princípio empirista da testabilidade empírica tem associado a ele um critério metodológico, que é o “princípio lógico de Carnot”, o qual Duhem define nos seguintes termos: “Na física, um critério apenas permite a rejeição como falso de um juízo que não implica uma contradição lógica: o relato de um flagrante desacordo entre este e os fatos da experiência” (DUHEM, 1980, p. 97). Esse critério, segundo Duhem, não pode ser aplicado para decidir o debate, por causa da estratégia da aplicação do mecanismo de massas em movimento.

Portanto, o debate não é exatamente entre teorias físicas ou explicações físicas, mas sobre métodos de construção de teorias físicas ou explicações físicas. Esse debate, porém, não se resolve por testes empíricos. Trata-se de um debate metametodológico, sobre quais são os métodos de construção de teorias físicas ou explicações físicas (CHIAPPIN, 1989). Esse é um debate entre aqueles que acreditam que todos os fenômenos podem ser explicados mecanicamente e aqueles que rejeitam essa proposição não pode ser decidido com recurso aos procedimentos experimentais.

Estamos aqui no coração da concepção normativa da ciência de Duhem, que, acredito, foi incorporada por Popper sem os devidos cuidados. Trata-se de uma decisão metodológica de quais métodos devem ser empregados na construção das teorias físicas, debate que depende de quais funções e os objetivos são atribuídas

à ciência. Duhem está consciente de que, nesse debate, a decisão de rejeitar essa abordagem transcende o método experimental Segundo a concepção normativa de ciência de Duhem,

[é] impossível a qualquer um que adote os processos do método experimental declarar verdadeira esta proposição: *Todos os fenômenos físicos são explicados mecanicamente*. É também impossível declará-la falsa. *Esta proposição transcende o método experimental*. (DUHEM, 1980, p. 97-98).

A rejeição do programa mecanicista, em última instância, *ut supra dixit*, é, na concepção de Duhem, uma decisão metodológico-epistemológica, e não científica. (CHIAPPIN, 1989; 2014). A concepção de ciência de Duhem com o núcleo na falseabilidade das teorias científicas decorre de sua dura crítica ao uso da hipótese atomista da matéria nas explicações mecanicistas, uma vez que tal hipótese é a principal fonte de indeterminações e arbitrariedades, na física, que conduzem à não falseabilidade das teorias.

Outra objeção relativamente ao uso de mecanismos relacionado à abordagem analítica para construir explicações mecânicas é que estes não proporcionam “[...] nenhum método regular, certo de efetuar tal passagem [das leis para a construção dos mecanismos]: é se reduzido a conjecturá-lo” (DUHEM, pp 78-79). Nesse aspecto, Duhem se une a Huygens, para quem o programa mecanicista é formado através da forma e do movimento, mas não descreve quais formas, nem quais movimentos. A abordagem analítica, conforme Duhem, não pode proporcionar qualquer método regular para construir explicações mecânicas (assumidas como provadas por tal abordagem), a partir das leis empíricas descobertas pelo método experimental. Há, para ele, uma indeterminação inerente na aplicação do método analítico. A teoria da matéria não se confunde com o método analítico, este é uma linguagem. A identificação deste método com a teoria da matéria leva a explicações com mecanismos que são inerentemente indeterminados uma vez que são resultados de conjecturas e não são falseáveis:

Quando a observação revela certas discrepâncias entre a dinâmica de Lagrange e os fenômenos naturais, desafiando toda contradição, ela pode afirmar que estas são devidas a movimentos ocultos; *mas, se das leis dadas experimentalmente por tais discrepâncias se deseja retornar às leis dos movimentos ocultos que as produzem, não se encontrará em seus ensinamentos nenhum método regular, certo de efetuar tal passagem: é-se reduzido a conjecturá-lo*. (DUHEM, 1980, p. 78-79, [grifo nosso]).

Novamente, para Duhem, o problema está relacionado com a ideia de que o método da teoria física deve ser um método racional para construir teorias físicas. Essa racionalidade, que requer controle, exige que uma relação entre a base conceitual do sistema mecânico e das leis empíricas seja estabelecida por intermédio de passos controlados e regulados. O método analítico não pode satisfazer a condição de racionalidade, no que diz respeito à construção da explicação mecânica. A conclusão

de Poincaré de que, se há um modelo mecânico, há infinitos modelos, conduz – interpreta Duhem – à posição de que se pode apenas conjecturar sobre explicações mecânicas, não construí-las através de um método regular.

A termodinâmica, elaborada de acordo com os princípios do método lagrangeano, pode proporcionar um método regular para construir o potencial termodinâmico do sistema, a partir das leis empíricas descobertas pelo método experimental. É por isso que a termodinâmica deve ser proposta como a nova teoria unificadora da física. No estudo da termodinâmica, essa transição das leis empíricas para a construção do potencial termodinâmico envolve pouca arbitrariedade e pouca conjectura.

Entretanto, a aplicação da teoria mecânica conforme o método analítico traz ainda outro problema bastante contemporâneo e outra objeção. Essa aplicação constitui também uma tentativa de satisfazer aquilo que a maioria dos físicos almeja e Duhem defende como prioritário, pois se associa com a essência mesma da teoria física, ou seja, a demanda pela unidade lógica assentada em poucos princípios.

Contudo, se o método analítico pode, em princípio, proporcionar os meios para buscar essa unidade lógica com poucos princípios, para todos os fenômenos físicos (DUHEM, 1980, p. 101), essa unificação, por seu turno, exige o uso de uma teoria da matéria cada vez mais sofisticada e complexa, a qual não está na origem do método analítico que considera pontos-massa. Essa é a tese que Duhem parece defender, ao declarar que

[a conclusão de Gibbs] mostra que os físicos desejosos de explicar os fenômenos através de argumentos mecânicos devem renunciar a hipóteses que atribuam aos átomos uma constituição muito simples, tais como pontos-massas ou sólidos rígidos [...]. (DUHEM, 1980, p. 66).

Por meio dessa tese metodológica, ele está afirmando que é inevitável, como resultado dessa busca pela unidade lógica com os recursos do método analítico, um regresso ao infinito implicado pelo uso de hipóteses atomistas para explicar o maior em termos do sucessivamente menor. Essa tese é retomada e formulada posteriormente por Dirac, que salienta:

A necessidade de distanciar-se das idéias clássicas quando se deseja dar conta da estrutura última da matéria pode ser vista não apenas a partir dos fatos estabelecidos experimentalmente, mas também em bases filosóficas gerais. Em uma explicação clássica da constituição da matéria, assumir-se-ia que esta é formada por um grande número de pequenas partes constituintes e postular-se-iam leis para o comportamento destas partes, das quais as leis da matéria livre poderiam ser deduzidas. Isto, todavia, não completaria a explicação, uma vez que a questão da estrutura e estabilidade das partes constituintes não é considerada. Para examiná-la, torna-se necessário postular que cada parte constituinte é formada por partes menores, em termos das quais seu comportamento deve ser explicado. Este procedimento claramente não possui um fim, de tal modo que, nestas linhas, jamais se pode obter a estrutura última da matéria. Na medida em que grande e pequeno são conceitos

meramente relativos, é inútil explicar o grande em termos do pequeno. (DIRAC, 1958, p. 3).

Dessa maneira, se, por um lado, o programa mecanicista, de acordo com o método analítico, pode satisfazer a exigência de uma unidade lógica para a física, por outro lado, isso é obtido ao custo de levar a indeterminação de suas hipóteses atomistas a uma estrutura cada vez mais fina e complexa da matéria, gerando uma regressão ao infinito. Há uma infinidade de mecanismos físicos, segundo Poincaré, que podem satisfazer as estruturas hamiltonianas e lagrangeanas. Ainda assim, a evolução da ciência, desde o debate entre Duhem e Poincaré, tem nitidamente favorecido a concepção pragmatista/convencionalista que se define por uma metodologia de construção de modelos da matéria, mecanismos formados da combinação de massas, forças e movimento, pois, ainda que possam vir a ser contraditórios entre si, são valorizados sobretudo pelo seu potencial heurístico de gerador de novas ideias e teorias.

Concluindo esses pensamentos acerca da posição de Duhem relativamente à de Poincaré, observa-se que, no entender do primeiro, o programa mecanicista enfrenta um dilema insolúvel e que pode valer, para os dias de hoje, acerca das sempre emergentes novas partículas, no caso, partícula de Deus (bóson de Higgs). Se esse programa pretende empregar a teoria mecânica de acordo com o método sintético, ele deve abandonar o princípio da unidade lógica. Se os mecanicistas desejam usar a teoria mecânica conforme o método analítico, contendo a hipótese atomista da matéria e resgatando, desse modo, em princípio, seu propósito de proporcionar um princípio unificador de toda a física, eles devem estar preparados para contemplar a possibilidade de uma regressão infinita, em termos de teoria da matéria. A unificação seria procurada pela forma ou pelo conteúdo. Colocado de outra forma, pelo princípio da ação mínima, ou por princípios de máximos ou mínimos, ou por uma teoria da matéria.

A busca por partículas cada vez mais subatômicas, como a partícula de Deus (bóson de Higgs), parece estar indo nessa direção, com recursos a aparelhos, para a implementação do método experimental, cada vez mais potentes e complexos – e, por que não, mais caros. Pára, porém, um enorme risco sobre a decidibilidade de tais experimentos, dado o grau de complexidade neles envolvido, visto que a complexidade significa um grande número e variedade de parâmetros, os quais precisam ser ajustados, e parece, como ensina a tradição dos mecanismos de massas em movimento, que eles sempre podem ser ajustados para obter os resultados desejados.

Nesse sentido, o bóson de Higgs, a partícula de Deus, tem um valor instrumental proveniente do grande número de graus de liberdade envolvidos no ajuste de parâmetros, ou tem um valor objetivo? É possível que um experimento, dessa forma conduzido e nesse grau de complexidade, seja capaz de decidir de modo conclusivo pelo valor objetivo?

## Referências

BOLTZMANN, L. On the fundamental principles and equations of Mechanics. In: MCGUINNESS, B. (ed.). *Theoretical physics and philosophical problems*. Boston: D. Reidel, 1974.

CALLEN, H. *Thermodynamics*. New York: John Afely & Sons, 1960.

CHIAPPIN, J.R.N. *Duhem's theory of science: an interplay between History and Philosophy of Science*. Ph.D Thesis. University of Pittsburg, 1989.

CHIAPPIN, J.R.N. Matematização da natureza e os fundamentos filosóficos da mecânica. *Argumentos: Revista de Filosofia*, v.10, p.167-192, 2013.

CHIAPPIN, J.R.N. A teoria dinâmica do conhecimento de Duhem: um termo médio entre a concepção metafísica clássica da ciência e a concepção do convencionalismo/pragmatismo (Poincaré). *Trans/form/ação*, 2014. [no prelo.]

DIRAC, P.A.M. *The principles of quantum mechanics*. Oxford: Clarendon Press, 1958.

DUGAS, R. *A history of Mechanics*. New York: Dover, 1988.

DUHEM, P. *Le potentiel thermodynamique et ses applications à la mécanique chimique et à l'étude des phénomènes électriques*. Paris: A. Hermann, 1886.

\_\_\_\_\_. Commentaire aux principes de la thermodynamique – Troisième partie: Les équations générales de le thermodynamique. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, nº 10, p. 207-285, 1894.

\_\_\_\_\_. Théorie et pratique. *Revue philomathique de Bordeaux et du Sud-Ouest*. Bordeaux: Société Philomathique, p. 250-262, 1900.

\_\_\_\_\_. Josiah-Willar Gibbs, à propos de la publication de ses Mémoires scientifiques. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, n. 31, p.1-31, 1907.

\_\_\_\_\_. La valeur de la théorie physique, à propos d'un livre récent. *Revue générale des sciences pures et appliquées*, n. XIX, p. 7-19, 1908.

\_\_\_\_\_. *The aim and structure of physical theory*. New York: Atheneum, 1974.

\_\_\_\_\_. *Evolution of Mechanics*. The Netherlands: Sijthoff & Noordhoff, 1980.

GOLDSTEIN, H. *Classical Mechanics*. New York: Addison-Wesley. 1980.

LANCZOS, C. *The variational principles of Mechanics*. New York: Dover, 1970.

LARANJEIRAS, CASSIO E CHIAPPIN, J.R.N. A heuristic de Boltzman e a emergência do programa mecânico-estatístico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, p.297-312, 2006.

LATSI, S. J. A research programme in economics. In: LATSI, S. J. (ed.). *Method and appraisal in Economics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1976.

LEECH, J.W. *Mecânica analítica*. São Paulo: EDUSP, 1971.

MAXWELL, J. C. *A treatise on electricity and magnetism*. New York: Dover, 1954.

\_\_\_\_\_. *A treatise on electricity and magnetism*. Vol. 1. Oxford: Clarendon Press, 1881.

\_\_\_\_\_. *Matter and motion*. New York: Macmillan, 1920.

PARETO, V. *Manuel d'économie politique*. Paris: V. Giard et E. Briere, 1909.

POINCARÉ, H. *Thermodynamique*. Paris: Georges Carré, 1893.

\_\_\_\_\_. *Électricité et Optique: la lumière et les théories électrodynamiques*. Leçons professées à la Sorbonne en 1888 et 1899. Paris: Gauthier-Villars, 1901.

POPPER, K. *The Logic of scientific discovery*. New York: Harper Torchbooks, 1968.

### **Endereço/ Address**

José R.N. Chiappin  
Departamento de Economia-FEA-USP  
Av. Prof. Luciano Gualberto, 908  
CEP 05508-010 – Cidade Universitária  
São Paulo SP

Data de envio: 09-01-14

Data de aprovação: 02-03-14