

# A matematização da natureza e os fundamentos filosóficos da teoria mecânica

## RESUMO

O objetivo é analisar o problema da matematização, como filosofia do conhecimento, e a representação dos fenômenos da natureza segundo a concepção sintética da teoria mecânica como subsídio para o debate entre Duhem e Poincaré sobre o estatuto cognitivo da física e fonte da concepção do realismo estrutural e convergente de Duhem. A abordagem sintética reduz a teoria física à construção de modelos mecânicos e tem duas interpretações: as escolas inglesa e continental. As críticas à concepção sintética da filosofia mecânica dão origem à concepção analítica que se desenvolve para ser interpretada como uma linguagem sem a semântica mecânica.

**Palavras-chave:** Teoria Mecânica; Modelos Mecânicos; Matematização da Natureza; Método Sintético; Mecânica Analítica.

## ABSTRACT

The aim is approaching the problem of the mathematization, as knowledge philosophy, and representation of the natural phenomena according to the synthetic method of mechanical theory. This method reduces physical theory to building up mechanical models. The criticism to this approach, by construction of bizarre models, is followed by the development of the analytic mechanics and its interpretation as a language and its extension to other domains of physics. The conflict between both interpretations defines the background for the debate between Duhem and Poincaré on the cognitive value of science the source of Duhem's structural and convergent realism.

**Keywords:** Mechanical Theory; Mechanical Models; Mathematization of Nature; Synthetical Method Analytic mechanics.

\* Professor do Curso de Economia/FEA e Filosofia (Pós)-USP. E-mail: chiappin@usp.br

Este artigo concentra-se sobre a construção da concepção da ciência associada à matematização da natureza e aos fundamentos filosóficos da teoria mecânica. Seu propósito é investigar os fundamentos metodológicos e epistemológicos do conflito entre as filosofias da mecânica, sintética e analítica, como pano de fundo teórico para entender o debate epistemológico entre Duhem e Poincaré sobre o valor cognitivo da ciência e construção da proposta de Duhem de um realismo estrutural e convergente (CHIAPPIN, 1989, 2011) para contrapor às consequências metodológicas de Poincaré acerca da mecânica com sua legitimação da aplicação do princípio metodológico da subdeterminação da teoria pelos dados (PSTD) em ciência e com sua construção da concepção convencionalista/pragmatista da ciência (CHIAPPIN, 1989, 2011). Entre outros motivos de sua importância está a que ele emerge posteriormente como o debate entre as concepções de Popper e dos positivistas lógicos de que nossa tese é de que a concepção normativa de Popper da ciência foi desenvolvida a partir da mesma proposta por Duhem, embora Popper jamais tenha feito a ele qualquer referência nesse sentido.

A física matemática, que nasce, no século XVII, com a decisão ontológica de interpretar a natureza como mecânica transforma-se sistematicamente, na escola inglesa, em modelos mecânicos concretos e materiais com valor pragmático sem valor objetivo, enquanto, na escola continental, adiciona-se, na explicação mecânica, a exigência do rigor geométrico. Deve-se, portanto, explorar os problemas da concordância entre tais interpretações na aplicação da teoria mecânica para explicar os fenômenos físicos. Esta análise pretende expor os problemas do método sintético, a construção de modelos mecânicos, a teoria mecânica como teoria física e a transição para mecânica analítica como um novo método de construção da teoria física e para uma nova concepção física matemática autônoma relativamente à mecânica.

A origem dessas duas abordagens, a sintética e a analítica, à teoria física pode ser retracada à diferença que Descartes atribui ao método sintético e método analítico em suas aplicações à geometria. Descartes considera que as abordagens geométricas na solução do problema de Pappus (DESCARTES, 1947. p. 60-71) eram conduzidas, pelos antigos, segundo o método sintético. O método sintético pressupõe, na abordagem da geometria, em trabalhar problemas de modo concreto, até mesmo material, e sob condições específicas. Essa era a razão pela qual o problema não encontrava sua solução geral, mas apenas soluções particulares e que não permitiam generalização. Ele se propõe substituir o método sintético pelo método analítico na abordagem de solução de problemas de geometria, atribuindo a esse método o mérito de ter encontrado a solução para o problema de Pappus (VUILLEMIN, 1960).

Esse método consiste em descobrir primeiramente as condições sob as quais o problema tem solução expressando-o em termos algébricos. Consegue então representar a solução em termos de uma equação algébrica de segunda

ordem. Com as regras estabelecidas entre as operações matemáticas e as propriedades geométricas. Descartes pode transformar uma na outra criando um dos componentes fundamentais do método, que está em encontrar uma representação do problema que facilita sua solução. Mas, ainda assim parece permanecer a ideia básica de que resolver um problema é sempre poder construir, literalmente, no sentido mecânico, sua solução. Na geometria a representação pode ser a álgebra e vice-versa. Todavia, a solução deve sempre ser passível de ser construída. Não é por outra razão que, na física, a representação que ajuda a resolver problemas é a representação mecânica dos fenômenos. Isto significa construção de modelos mecânicos. Tal ideia de física como construção de modelos mecânicos provém da ideia da geometria como construção da solução. Descartes descreve, em suas reflexões sobre a geometria, em particular, sobre a abordagem de solução de problemas, por exemplo, dois métodos de abordar o problema de encontrar a tangente à curva: método geométrico ou algébrico e o método mecânico. As ideias básicas que diferenciam esses dois métodos são que o método sintético trabalha com modelos concretos, materiais, e, por conseguinte, particulares em sua abordagem da solução de problemas, enquanto o método analítico é um método abstrato buscando estabelecer as condições mais gerais do problema, por meio de representações com equações algébricas.

Contudo, o primeiro passo era que essas curvas deveriam ser passíveis de serem construídas, em princípio, por meio de regras, inclusive com recursos de engenharia mecânica. Não se trata apenas e necessariamente de curvas que têm associadas a elas equações algébricas, mas, antes, e, prioritariamente curvas que podem ser construídas, por regras mecânicas, e, logo, buscar a construção das equações algébricas, a partir das quais se pudesse classificar e compreender melhor a natureza dessas curvas. O sistemático exercício envolvendo a construção de curvas e a elaboração de equações algébricas associadas a elas mostrou a força do papel da representação, em ambas as direções, no processo de solução de problemas (DESCARTES, 1954; 1963, p.134-185; 1947, p. 66).

Descartes estende a utilização desses dois métodos às aplicações da mecânica para a solução de problemas na ótica, como, por exemplo, na elaboração da justificação ou explicação mecânica das leis da ótica e também da explicação do arco-íris. Para Descartes, a matematização da natureza é o meio de analisá-la e conquistá-la. Esse problema é resolvido primeiro ontologicamente por considerar que sua natureza é mecânica formada de massas em movimento. Em segundo lugar, por considerar que, em isomorfia com a natureza do mundo físico, a física é física matemática, trabalhando apenas com quantidades que representam as grandezas físicas no mundo, como a massa e a velocidade. Essa solução ontológica da natureza como mecânica, expurgando toda a qualidade, é para garantir que a física seja associada com a física matemática. Ela reduz a teoria física, como matemática, a teoria mecânica.

A teoria física tem, enquanto teoria mecânica, de proporcionar explicações mecânicas que são construídas, na linha do método sintético, como modelos mecânicos concretos e até mesmo materiais. O aspecto da física matemática, propriamente dito, não se perde, com a construção de modelos mecânicos, pela exigência adicional de que a explicação, no caso, mecânica, deva ser organizada conforme as regras do modelo geométrico, e, portanto, como dedução numa sequência de proposições em que algumas têm suas conexões sustentadas por esses modelos mecânicos. Descartes oferta exemplos desse método sintético tanto em seu *La Dioptrique* como em *Les Météores* (DESCARTES, 1963, p. 652; p. 720) e *The Geometry* (DESCARTES, 1954; 1947) que são apêndices do livro *Discours de La Méthode* (DESCARTES, 1963, p. 568). Esse método consistiria em construir modelos mecânicos concretos de corpúsculos, com tamanho e formas, em movimento, porém o desenvolvimento da explicação deveria seguir a forma do modelo geométrico, ou seja, construir uma base com um mínimo de conceitos e princípios e a explicação ser elaborada como uma sequência dedutiva de proposições. Exemplos desses modelos, mecânicos e concretos, são aqueles da bola de tênis na explicação da primeira e segunda lei da ótica, da tina cheia de uvas com vinho e da barra de madeira para explicar o comportamento da luz, o modelo da bola de vidro oca cheia de água para simular a gota de água na construção da explicação do arco-íris.

O aspecto analítico dessa explicação encontra-se na idéia de que, na abordagem da solução do problema pela construção da explicação mecânica das duas leis da ótica, pressupõe-se o problema resolvido, isto é, que as leis da ótica são conhecidas e também que a base do conhecimento constituídas das leis da mecânica também são conhecidas. Utilizando desses dados busca-se encontrar a condição que resolve o problema: a idéia intermediária, ou seja, as proposições que unem a base do conhecimento, com as leis da mecânica, às leis da ótica que se quer explicar. Como não se conhece a natureza da luz, constrói-se um modelo mecânico sobre a natureza da luz, no caso, associando-a a um movimento de um corpúsculo (bola de tênis). Essa é a idéia intermediária.

A idéia intermediária de um problema de física é sempre a com construção de um modelo mecânico que o resolve assim como para resolver um problema em geometria se deve poder construir a sua solução. Se se trata de uma equação, pode-se então convertê-la em linhas e curvas e deve-se poder sempre construí-la. O método que Descartes desenvolve na Geometria está relacionado à construção de curvas por meio de regras, como aquelas explicitadas no início do livro I, que descrevem as relações entre as operações algébricas e seus correspondentes geométricos, e, mesmo regras mecânicas como no caso da construção de várias curvas descritas no livro II e III (DESCARTES, 1954; 1947, p.79, p.124, p.142).

A teoria mecânica, que sucede à concepção mecanicista cartesiana (CHIAPPIN, 1989, 2008), se desenvolve, em seu método de construção segundo o modelo geométrico, de acordo com essas duas versões: a abordagem sintética e a abordagem analítica. Essa decomposição é feita por P. Duhem com o propósito de proceder a uma análise do mecanicismo, averiguando dos aspectos metodológicos desses métodos, seus significados, seus obstáculos e contribuições ao desenvolvimento da teoria física.

A análise de Duhem sobre o mecanicismo se encontra organizada ao redor da avaliação crítica desses dois métodos de aplicar a teoria mecânica para explicar os fenômenos físicos. Ele menciona essa decomposição na seguinte passagem:

As tentativas feitas para explicar mecanicamente os fenômenos físicos que o universo apresenta situam-se, com precisão, em duas categorias. As tentativas colocadas na primeira efetuam-se de acordo com um método que pode ser corretamente denominado *Método Sintético* [...]; aos olhos da maioria dos físicos, o método sintético não parece mais capaz de proporcionar uma explicação mecânica e completa dos fenômenos naturais; é, pois, do *Método Analítico* que se requer, hoje, tal explicação. (DUHEM, 1980, p. 95; grifos meus.)

Cada uma dessas duas concepções do método mecânico de construção de teorias físicas proporciona visões diferentes acerca tanto do significado como do objetivo das explicações mecânicas e da física teórica. Duhem investiga, criticamente com efeito, os problemas e as dificuldades que afetam ambas as abordagens, avaliando-as não somente no que diz respeito à sua capacidade de proporcionar uma explicação mecânica geral e unificadora da física (PUL), mas também de tornar o desenvolvimento dessa ciência racional e contínuo (TA-2). Além disso, elas são avaliadas a partir de sua própria concepção da teoria física como um sistema racional.

A explicação mecânica dos fenômenos físicos segundo a abordagem sintética é descrita, por Duhem, da seguinte maneira:

Neste método, inicia-se construindo um mecanismo a partir de todas as peças; diz-se que algumas são os corpos que o compõem, outras são as formas, os tamanhos, as massas, e ainda outras as forças que agem sobre ele; destes dados são extraídas as leis de acordo com as quais o mecanismo se move; então, comparando-se estas leis com as leis experimentais que ele deseja explicar, julga-se se há um acordo suficiente entre elas. (DUHEM, 1980, p. 95.)

Não obstante, o foco principal deste artigo é o método sintético de aplicação da mecânica na construção da teoria física no século XIX lembrando que ele é a primeira tentativa de se elaborar uma física matemática. Na raiz do método sintético da teoria mecânica, encontra-se uma tentativa de definir

mecanismos específicos e detalhados, ou modelos mecânicos baseados em hipóteses específicas sobre a forma dos átomos e das moléculas, sobre seu tamanho e arranjo particular. Para cada categoria dos fenômenos físicos, o método sintético define uma explicação mecânica baseada em um número específico de corpos, com um arranjo particular de formas, e com movimentos e massas definidas. Tais arranjos supostamente expressam (ou imitam e simulam) a explicação causal dos fenômenos físicos, ou, [...] “nas palavras dos físicos ingleses, o modelo” (DUHEM, 1980, p. 102). Esses modelos/mecanismos podem posteriormente ser constituídos por elementos reais, tais como fluidos ou corpúsculos, com tamanhos, formas e massas definidas. Quando feitos de plástico, madeira ou mesmo quando desenhados, são denominados modelos de escala. O uso de modelos reais e concretos é uma característica da escola inglesa.

Embora essa abordagem sintéticas não fosse o único meio de se aplicar a teoria mecânica, ela prevaleceu sobre as demais, sendo praticada por quase todos que trabalhavam em programas de pesquisa mecanicistas. Como resultado, a maior parte das explicações mecânicas se encontra baseada nesse método de construção de teorias físicas. Há numerosos exemplos. Duhem cita a teoria cartesiana das atrações e repulsões magnéticas, a explicação cartesiana do peso pela ação do vórtice, o éter girostático de Kelvin (DUHEM, 1980, p. 96), as superfícies termodinâmicas de Maxwell para descrever as regras de fase de Gibbs, a explicação mecânica das propriedades da luz proposta por Descartes, a teoria física de Laplace, e, sobretudo, as construções celulares de Maxwell, por meio das quais ele tentou descrever as ações eletromagnéticas (MAXWELL, 1952). Esse modelo de Maxwell simula um mecanismo utilizado para explicar (mecanicamente) os efeitos eletromagnéticos e eletrostáticos. Ainda que Duhem organize sua análise de forma a combinar, sob uma mesma categoria (o método sintético), a teoria mecânica de Descartes e Laplace (membros da escola continental) com as duas primeiras teorias eletromagnéticas de Maxwell (criador e principal representante da escola inglesa), há entre elas diferenças ontológicas, epistemológicas e metodológicas essenciais no que diz respeito à caracterização da teoria física. A compreensão das diferenças entre estas duas concepções revela-se crucial para que se entenda o que vem a ser teoria física e o modo como Duhem a concebe como uma terceira via (um *tertium*) entre elas. Sua análise crítica do mecanicismo é guiada também pela ideia de que a teoria física, como física matemática, possui como objetivo representar racionalmente as leis empíricas e deve ser construída através de um método racional. Contudo, a própria abordagem sintética da mecânica encontra diferentes versões conformes as escolas. De acordo com Duhem há duas principais escolas sobre a teoria mecânica na abordagem sintética, a escola inglesa e a escola continental ou do racionalismo clássico. Essa última está comprometida com uma concepção metafísica da física, enquanto a escola inglesa tem uma concepção mais pragmática e instrumental da física.

## As duas versões do método sintético: a escola inglesa e a escola continental

Duhem argumenta, desde o início, que o uso de teorias mecânicas não é suficiente para distinguir entre a escola inglesa e a escola continental (ou a concepção metafísica da física). Ele escreve: “A predileção por teorias mecânicas ou explicativas não constitui, é claro, uma base suficiente para distinguir as doutrinas inglesas das tradições científicas florescentes em outros países” (DUHEM, 1974, p. 72). Ambas as escolas adotam o método sintético do programa mecanicista. Entretanto, elas diferem no modo como interpretam a física teórica e as explicações mecânicas, como representam suas bases conceituais, e como conectam estas últimas com as bases empíricas.

As nítidas distinções entre essas escolas também podem ser remontadas às distinções entre as propostas metafísica/racionalista ou pragmatista/empirista do programa mecanicista. Essas duas concepções do conhecimento científico influenciaram fortemente as várias formas de interpretação da abordagem sintética. Sem dúvida alguma, ambas as concepções buscam explicar os fenômenos físicos de acordo com essa abordagem sintética da mecânica; ambas tencionam, em conformidade a esta última, elaborar modelos definidos, específicos e detalhados da matéria e do movimento para explicar, mecanicamente, os fenômenos físicos.

### A escola continental

Além das características típicas do método sintético, isto é, o uso de um número restrito de conceitos mecânicos, aplicadas por meio de propriedades, específicas e definidas, de um sistema material particular, a escola continental requer que as explicações mecânicas se encontrem “[...] sujeitas a certos requerimentos lógicos” (DUHEM, 1974, p. 78). A escola cartesiana combina o método de construção de modelos mecânicos com o método geométrico de construir uma teoria física. Por exemplo, todos os conceitos mecânicos e as leis empíricas devem ser organizados na forma de um sistema axiomático rígido e único, constituído por conceitos e princípios bem estabelecidos. Todas as leis empíricas devem ser deduzidas matematicamente no interior desse sistema. A escola continental acompanha a tradição racionalista no que diz respeito à natureza da teoria física, tencionando que tal teoria seja modelada a partir dos ideais do sistema racional da geometria euclidiana. A teoria física é, assim, um sistema axiomático rigoroso que une suas definições e postulados à suas consequências testáveis. Com efeito, Duhem observa:

Para um francês ou um alemão, uma teoria física consiste, essencialmente, em um sistema lógico. *Deduções perfeitamente rigorosas unem as hipó-*

*teses na base de uma teoria às consequências dela deriváveis, e devem ser comparadas às leis experimentais. (DUHEM, 1974, p. 78; grifos meus).*

A escola continental requer ainda que os conceitos básicos da teoria física sejam quantitativos de tal forma que a linguagem algébrica possa ser usada em física. Os conceitos básicos são conceitos mecânicos por serem quantitativos. A teoria mecânica consiste, por conseguinte, tanto em um sistema racional quanto algébrico. Essa escola acompanha ainda a concepção metafísica associada a essa tradição racionalista, que define a natureza da teoria física como uma busca de explicações causais dos fenômenos físicos. Duhem descreve o modo como os geômetras franceses, que compuseram as primeiras teorias da física matemática, tinham uma tendência constante a considerá-las como as verdadeiras explicações, no sentido metafísico da palavra; admitiam ter atingido a realidade mesma das coisas e as verdadeiras causas dos fenômenos. Tal tendência, proveniente de Descartes, revela-se a cada instante nos escritos de Laplace e de Poisson, de Fresnel, Gauchy e Ampère. (DUHEM, 1893, p. 358).

O compromisso metafísico da escola continental ao “[...] princípio da identidade do real e do inteligível” (DUHEM, 1974, p. 320) requer que os conceitos mecânicos básicos representem as causas reais na natureza. O conteúdo físico de uma teoria é dado assumindo-se que os conceitos primários (massa, forma, movimento, e/ou força) e os princípios fundamentais, compostos a partir desses conceitos, representam propriedades mecânicas reais de um sistema material, e que as leis da natureza governam massas em movimento. Assume-se a existência de princípios causais em todos os fenômenos físicos. Todas as demais propriedades físicas devem ser reduzidas a esses conceitos mecânicos básicos. No entender dessa concepção, as teorias físicas são teorias explicativas, (DUHEM, 1974, p. 80), mas elas estão comprometidas a apresentar explicações causais dos fenômenos físicos. Descartes desenvolveu não somente uma ontologia, mas também uma epistemologia para legitimar tal concepção, e para definir metodologicamente as características típicas de sua teoria física e de seu método de construção. Ambas as exigências, a racionalista e a metafísica, estabelecem diferenças fundamentais entre as concepções de teoria física preconizadas pela escola continental e pela escola inglesa. A tradição racionalista da primeira constrói as teorias de acordo com regras provenientes de princípios inspirados na geometria, tais como, simplicidade, coerência e unidade lógica. Tais princípios são também metafísicos, na medida em que são assumidos como constituindo propriedades na natureza (de acordo com a descrição de Descartes).

A escola continental, além de requerer que os conceitos mecânicos sejam unidos através de rígida estrutura axiomática e, que rigorosas cadeias de deduções estabeleçam a ligação entre a base conceitual do sistema mecânico e suas leis empíricas, exige igualmente que

[...] os corpos empregados para constituir estes mecanismos não sejam de modo algum similares aos corpos concretos e visíveis que observamos e manipulamos diariamente. Esses corpos são formados por uma matéria ideal e abstrata definida [...] (DUHEM, 1974, p. 73).

Portanto, o racionalismo clássico, além de aplicar o método sintético da teoria mecânica, requer que estes mecanismos sejam considerados em termos das propriedades simples e abstratas da matéria, ao invés de empregar modelos concretos, visíveis e complexos. A abstração e a simplicidade constituem-se em restrições formais sobre as propriedades mecânicas trazidas pela explicação racionalista dos fenômenos físicos. Duhem formula com muita clareza as propriedades particulares que os mecanismos devem possuir de acordo com a escola continental:

[...] como as faculdades de um francês ou de um alemão não lhes permitem imaginar um mecanismo que seja algo complicado, ambos irão exigir que toda tentativa de explicar o universo mecanicamente seja *simples*; toda explicação que exija um número considerável de substâncias elementares, que seriam combinadas em um organismo complicado, será, em primeiro lugar, rejeitada por eles como inverossímil; requererão que se reduza a matéria, em última análise, a um pequeno número de espécies de átomos elementares, dois ou três no máximo; que estes átomos possuam forma geométrica simples; que eles sejam dotados apenas de algumas propriedades mecânicas essenciais; que estas propriedades sejam expressas em proposições muito breves e de muito fácil compreensão, proposições que inclusive eles buscarão justificar através de considerações metafísicas. Que se examinem todas as explicações mecânicas imaginadas pelos franceses e pelos alemães, desde as doutrinas de Descartes até as teorias de P. Leray, que analisamos aqui mesmo há pouco, e reconhecer-se-á sempre, de maneira bastante nítida, a dupla tendência em direção à abstração e à simplicidade (DUHEM, 1893, p. 352).

Entre as virtudes racionalistas que a escola continental espera que a teoria física satisfaça, salienta-se a unidade lógica. Tal princípio rejeita quaisquer contradições e incompatibilidades, tanto intra como inter teoricamente. Por um lado, ele recusa contradições entre as leis de uma teoria, pressupõe sua independência e economia, além de exigir que as consequências extraídas destas leis não sejam inconsistentes. Por outro, de um conjunto de teorias físicas, deve-se, segundo ele, selecionar aquela que unifique o sistema; além disso, tais teorias não podem ser contraditórias, devem ser independentes e consistentes entre si. Semelhante princípio perpassa as diferentes teorias físicas da escola continental. A teoria mecânica, conforme tal escola, constitui-se na estrutura unificadora da física, e a maioria de seus membros torna a teoria mecânica da matéria o meio pelo qual o programa mecanicista busca obter tal unificação. De Descartes a Poisson, o princípio da unidade lógica assumiu diversas formas, dependendo dos detalhes da teoria da matéria, permanecendo, todavia, sempre como uma categoria inquestionável na formulação

da teoria física. O princípio de unificação, no interior da proposta cartesiana, consiste no binômio matéria e movimento como compondo as explicações causais de qualquer fenômeno da natureza além de seu conjunto de princípios mecânicos fundamentais. Eles representam a base das explicações causais de todos os fenômenos físicos como a gravidade, luz, atrações e repulsões magnéticas (DUHEM, 1980, p. 472-473). Por sua vez Laplace, por sua vez, baseou o princípio de unidade em seu modelo mecânico-molecular da matéria, com forças centrais, e na mecânica de Newton. Lagrange difere, por sua vez, de Laplace na medida em que repousa o princípio da unidade lógica não precisamente em uma teoria da matéria, mas antes em um sistema de coordenadas e forças generalizadas, e nos princípios das velocidades virtuais de D'Alembert.

Esse ponto é muito importante, não desenvolvimento de sua metodologia e epistemologia pois sua rejeição da teoria da matéria é central no seu desenvolvimento de uma concepção realista estrutural da ciência. Duhem rejeita a unificação da teoria física conduzida por uma teoria da matéria, porque se encontra comprometido com o objetivo unificador através de propriedades matemáticas, a estabilidade e o equilíbrio impostos pela termodinâmica, que o conduzirá a uma concepção estrutural. Ele emprega o método de Lagrange, denominado mecânica energética – seu método de construção da energia do sistema –, e torna o potencial do sistema seu conceito básico. A teoria física desenvolvida de acordo com esse método, e sem a teoria da matéria, foi apresentada pela formulação gibbsiana da termodinâmica. Esta última representa o modelo de unificação, para Duhem.

Conforme a escola continental, o princípio da unidade lógica é o princípio básico para a construção da teoria física (CHIAPPIN, 1989, capítulos III e V). De acordo com esse princípio, “[...] para um matemático da escola de Laplace ou de Ampère, seria absurdo apresentar duas explicações teóricas distintas para a mesma lei, e sustentar que estas duas explicações são igualmente válidas” (DUHEM, 1974, p. 81). O princípio da unidade lógica é compreendido pela tradição racionalista clássica como um princípio lógico, cuja violação é contrária às leis da razão, sendo, portanto, absurda. Ele exige que as incompatibilidades entre as teorias/leis e os conceitos sejam erradicadas da teoria física, e que todos os fenômenos físicos sejam deduzidos dos conceitos e princípios fundamentais da mecânica.

## **A escola inglesa**

A natureza e o caráter das explicações mecânicas dos fenômenos físicos elaboradas pela escola inglesa são explicitados por Lorde Kelvin, quando este observa:

[...] parece-me que o verdadeiro significado da questão ‘O que entendemos ou não por um assunto particular em física?’ é este: Podemos

proporcionar um modelo mecânico correspondente? [...] Jamais estou satisfeito enquanto não for capaz de construir um modelo mecânico do objeto; se puder construir tal modelo, eu o entendo; pois, enquanto não puder construí-lo, não o entendo (DUHEM, 1980, p. 102).

Dessa maneira, a formulação de modelos é o método de construção de teorias físicas, e a apresentação destas últimas é identificada com a construção de modelos. A aplicação sintética da teoria mecânica na escola inglesa é influenciada pela tradição empirista proveniente de Bacon, Locke, Hume e Newton. Em particular, a concepção experimentalista da teoria física é tomada da ótica de Newton. Na raiz dessa proposta se encontram o princípio metodológico da separabilidade e testabilidade isolada de hipóteses, os experimentos cruciais e o método indutivo (CHIAPPIN, 1989 capítulo III). Esse mesmo princípio pode também se encontrar associado à concepção básica de Newton sobre a mecânica, sendo aplicado a partículas isoladas. Com efeito, as leis fundamentais da mecânica, tais como formuladas por Newton, valem primeiramente para uma partícula singular apenas (LANCZOS, 1986, p. 4).

A escola inglesa tomou da tradição empirista a determinação de enfatizar os aspectos empíricos e práticos da física, em detrimento daqueles teóricos. Além disso, para essa escola, a adequação empírica representa o critério relevante para a aceitação de explicações mecânicas (ao invés dos critérios racionalistas). A maior parte da comunidade científica inglesa no século XIX não considerava os valores formais e racionalistas como critérios significativos para a construção de teorias físicas. A unidade lógica e outras virtudes racionalistas, tais como axiomatização, consistência e simplicidade, não são de grande valia para a elaboração de explicações mecânicas dos fenômenos. Segundo essa escola, diferentemente da continental, os modelos mecânicos são introduzidos sem qualquer preocupação com o estabelecimento de conceitos e hipóteses bem definidos a propósito das propriedades relevantes do sistema mecânico.

Uma explicação mecânica não é proporcionada através de um sistema bem construído de proposições, encadeadas logicamente a partir de definições e postulados até suas consequências testáveis, mas por meio de uma sequência de modelos figurativos, concretos e disparatados. A escola inglesa não requer um acordo racional entre o sistema mecânico e as leis empíricas que esse supostamente deve explicar. A teoria física é identificada com os modelos mecânicos, constituídos mesmo por elementos concretos e reais. Essa escola preconiza o direito (metodológico) de construção de um ou mais modelos mecânicos para cada fenômeno físico, ao invés de se limitar a um único, por conseguinte, de que uma teoria ou modelo é subdeterminado pelos dados.

A subdeterminação dos modelos pelos dados é um recurso metodológico para a construção de teorias físicas. Tanto Maxwell como Kelvin são exemplos representativos dessa escola, com suas teorias concebidas como uma sequência de modelos diversificados. Duhem afirma que, “[...] para um físico da escola de

Thomson ou de Maxwell, não há contradição no fato de que a mesma lei possa ser representada por dois modelos diferentes” (DUHEM, 1974, p. 81). Em outras palavras, eles substituem o princípio da unidade lógica (PUL) pelo princípio da subdeterminação da teoria pelos dados (PSTD) (CHIAPPIN, 1989). As incompatibilidades e contradições entre os modelos não significam violações de quaisquer princípios lógicos; representam, ao invés disso, recursos metodológicos na construção de explicações mecânicas. A escola inglesa também não exige acordo racional entre a base conceitual da teoria mecânica e a base empírica (constituída por leis). Essa conexão é feita através dos modelos que simulam tais leis físicas, ou mostram certa semelhança com as mesmas.

Nesse sentido, os modelos mecânicos constituem o meio através do qual esta conexão se estabelece. O critério relevante para aceitar tais modelos como uma explicação mecânica é apresentada em termos de uma “semelhança” entre o modelo e os fenômenos físicos representados. A adequação empírica é interpretada como um modo pictórico de simular os fenômenos físicos através de modelos, ao invés de se almejar um acordo lógico entre as leis experimentais e os princípios mecânicos. O método de construção de modelos para a elaboração de teorias não trata de derivações hipotético-dedutivas, logicamente rigorosas, das leis empíricas a partir do sistema conceitual da mecânica. Não há nada, no interior da escola inglesa, que se assemelhe ao sistema racional requerido pela escola continental. Essa conexão entre o sistema mecânico (de conceitos e princípios) e as leis empíricas revela-se frouxa e arbitrária. Duhem indica com muita clareza esse aspecto das explicações mecânicas inglesas ao afirmar:

*Quando, por outro lado, W. Thomson oferece um modelo mecânico para um grupo de fenômenos, ele não se impõe qualquer argumento racional muito detalhado para estabelecer uma conexão entre este aparato de corpos concretos e as leis físicas que ele é exortado a representar; pois a imaginação, a única preocupação do modelo, será o juiz exclusivo da semelhança entre o desenho e o objeto desenhado. (DUHEM, 1974, p. 79, grifos meus).*

Por essa razão, Duhem sustenta que o método de construção de modelos não é um procedimento racional para a elaboração de teorias. Ele não oferece vínculos rígidos os quais partem “[...] das hipóteses básicas para as consequências que podem ser comparadas com os fatos” (DUHEM, 1974, p. 80). Exemplos desse tipo de explicação também proliferam, a maioria deles proveniente dos trabalhos de Maxwell e de Kelvin. Duhem afirma que, nas conferências de Thomson dedicadas à exposição da dinâmica molecular e à teoria ondulatória da luz, “[...] há tantos modelos distintos para representar a função das moléculas materiais nos fenômenos quantas são as categorias dos últimos” (DUHEM, 1974, p. 82). Por exemplo, para representar as marcas de elasticidade em um cristal, Thomson modela a molécula material através

de “[...] oito massas esféricas ocupando os vértices de um paralelepípedo, e estas massas são conectadas umas às outras por um número maior ou menor de molas espirais” (DUHEM, 1974, p. 82). Por outro lado, para representar a “[...] teoria da dispersão da luz, ele modela a molécula material através de certo número de conchas rígidas, concêntricas, esféricas, mantidas naquela posição pelas molas. Uma variedade destes mecanismos é imerso no éter [...]” Isso não é tudo: se o problema é

[...] representar a polarização rotacional, então ele modela as moléculas materiais através de pequenas conchas rígidas; em cada uma delas, um girostato irá rodar rapidamente ao redor de um eixo fixado à concha”. Posteriormente, ele aumentará a sofisticação deste modelo introduzindo dois girostatos, cada um dos quais girando em direções opostas (DUHEM, 1974, p. 82).

E assim por diante.

A escola inglesa abandona todas as restrições racionalistas e requer que a explicação mecânica se constitua em uma representação pura, simples, visual, pictórica e figurativa. A representação pictórica deve prevalecer sobre a simplicidade e a abstração. Duhem indica a presença dessa exigência metodológica nessa escola quando assevera:

Não é o mesmo para as explicações mecânicas criadas pelos gênios britânicos. Sua poderosa faculdade imaginativa representa, sem dificuldade, os mecanismos mais intrincados; também não temem atribuir à matéria uma estrutura bastante complexa [...] Não apenas os edifícios pelos quais os físicos ingleses buscam representar a matéria são complicados, mas ainda os materiais que os formam não se reduzem a formas geométricas dotadas de algumas propriedades abstratas elementares; estes não são os materiais com os quais Descartes busca construir a “máquina” do mundo, simples figuras dotadas da propriedade de mudar, pelo choque, suas quantidades de movimento, sem nada perder; não, estes são os corpos concretos, semelhantes àqueles que vemos ou que tocamos; sólidos, rígidos ou elásticos, fluidos compressíveis ou não; certas vezes, para torná-los mais tangíveis, para que se melhor compreenda que não se trata de idéias elaboradas pela abstração, mas de corpos semelhantes àqueles que manipulamos diariamente, W. Thomson aprecia designá-los pelos nomes mais vulgares: ele os chama de cordas ou reverberações de campainhas. (DUHEM, 1893, p. 353-354).

Assim, as diferenças fundamentais entre a abordagem racionalista da escola continental e aquela de cunho pragmatista/empirista da escola inglesa podem ser resumidas em termos da definição da natureza da teoria física, bem como em relação ao valor cognitivo da teoria mecânica, embora a primeira seja básica. A escola continental, como vimos, adota o método racional, explicações mecânicas e o modelo geométrico, ao passo que a inglesa emprega aquele (muito mais caso a caso) de construção de modelos, no caso, modelos

mecânicos. No que diz respeito aos princípios da unidade lógica, PUL, e da subdeterminação da teoria pelos dados, PSTD, Duhem é bastante enfático ao salientar que as diferenças são nítidas. Com efeito, para a escola continental,

[...] seria absurdo apresentar duas explicações distintas da mesma lei e sustentar que estas duas explicações podem ser verdadeiras simultaneamente; para um físico inglês, não haveria qualquer contradição no fato de que a mesma lei pudesse ser representada de duas maneiras diferentes através de dois modelos distintos (DUHEM, 1893c, p. 360).

A escola continental aplica o princípio da unidade lógica, PUL, enquanto a inglesa utiliza o princípio da subdeterminação (PSTD). Juntamente com a rejeição do princípio da unidade lógica, PUL, a escola inglesa destrói outro valor racionalista bastante apreciado, a saber, a noção da teoria física como um sistema racional. Duhem afirma:

A teoria para ele [da escola inglesa] não é nem uma explicação nem uma classificação racional das leis físicas, mas um modelo destas leis, um modelo não construído para satisfazer a razão, mas para o prazer da imaginação. (DUHEM, 1974, p. 81).

Duhem salienta o fato de que o método de construção de modelos constitui um procedimento não racional para a elaboração de teorias físicas, e que as teorias assim construídas são sistemas não racionais, incapazes de oferecer uma classificação racional das leis empíricas, devendo, assim, ser rejeitadas. Essa é uma de suas severas e reiteradas críticas à escola inglesa.

Além disto, nas teorias inglesas, estes disparates, estas incoerências, estas contradições, somos levados a julgá-los severamente, porque buscamos um *sistema racional* onde o autor não pretende nos dar senão uma obra da imaginação. (DUHEM, 1893, p. 361; grifos meus).

Roger Ariew interpreta essa passagem exatamente como Duhem pretende, modelos não devem pertencer à teoria física; contudo, Ariew não completa que Duhem está aqui pensando na física enquanto física teórica, a qual, segundo ele, deve ser escrita numa estrutura matemática axiomatizada. Ariew faz o seu comentário acerca da rejeição de Duhem a respeito dos modelos,

[...] a objeção [de Duhem] é clara: a construção de modelos, aquilo que a escola inglesa herdou de Faraday, não possui um lugar na teoria física (para além de um papel heurístico menor); ela não pode nem ser baseada no realismo, no pensamento de que as teorias físicas são estruturas explicativas, nem no instrumentalismo, no pensamento de que tais teorias são estruturas classificatórias ou de representação (ARIEW, 1987, p. 147).

O primeiro problema com esse comentário é o fato de este identificar a proposta de Duhem com uma posição instrumentalista/convencionalista. O

segundo problema, o qual, aliás, permite explicar justamente esta identificação, está no seu esquecimento do termo essencial dessa passagem de Duhem: a classificação racional. É certo que Duhem aceita modelos como estruturas representativas e classificatórias, mas ele não admite que os próprios modelos se constituam em representações ou classificações *racionais*. O termo “racional” é básico, por refletir a verdadeira natureza de sua concepção; seu compromisso racionalista gera uma demarcação relativamente à proposta convencionalista/instrumentalista de teoria física. De qualquer modo, é importante deixar claro que é esse compromisso (racionalista) que possibilita explicar o outro compromisso de aplicar o princípio da unidade lógica na física. Em acréscimo, é sua concepção de teoria física como um sistema racional que explica sua crítica da escola inglesa por manipular sistemas teóricos como modelos algébricos. Tanto o convencionalismo, como o instrumentalismo, se encontram comprometidos com o princípio da subdeterminação da teoria física pelos dados.

A escola continental admite uma doutrina metafísica acerca da natureza da teoria física, em particular no que tange a seu estatuto cognitivo, afirmando que a teoria física busca explicar as causas reais dos fenômenos físicos. Seus principais representantes, Descartes, Laplace e Poisson, acreditam que a física matemática proporciona explicações mecânicas, causais e reais. Duas concepções de verdade se encontram subjacentes a essa proposta: a teoria da correspondência da verdade, que é aplicada à base conceitual dos sistemas mecânicos, e a teoria da coerência, que garante que os princípios matemáticos levem de verdades a verdades. Descartes adota estas duas concepções para garantir a objetividade da teoria física. A teoria da correspondência da verdade identifica os conceitos básicos da teoria física com as propriedades mecânicas dos corpos. Tais propriedades (massa, movimento e/ou força) são princípios causais e reais. Além disso, ela caracteriza o princípio racionalista da “identidade do real e do inteligível” (DUHEM, 1974, p. 320). A teoria da coerência identifica a teoria física com um sistema racional, e semelhante identificação garante que a objetividade (dada a base conceitual do sistema teórico) se dissemine por todo o sistema (DESCARTES, 1984a, p. 44).

As duas concepções da verdade formam a teoria da cascata da verdade, que contém toda a doutrina da objetividade da física no interior da teoria cartesiana do conhecimento. Tal doutrina caracteriza a abordagem metafísico-racionalista para legitimar o conhecimento teórico (objetividade) das teorias mecânicas sobre a natureza. Nada pode ser uma explicação real a menos que seja uma explicação mecânica. A escola inglesa rejeita a aplicação dessas duas concepções da verdade em física, uma vez que ambas se revelam incompatíveis tanto com a identificação, preconizada por essa escola, entre teoria física e seus modelos, como com a subdeterminação dos mesmos. Com efeito, tal subdeterminação não parece compatível, ao menos metodologicamente, com a ideia de que os elementos mecânicos presentes nos modelos possam repre-

sentar a causa dos fenômenos físicos; o princípio da subdeterminação é intrinsecamente uma regra metodológica antirrealista.

Em acréscimo, tal princípio não pode sustentar uma teoria da coerência da verdade. Desse modo, sob uma perspectiva metodológica, o realismo das hipóteses e o método de construção de modelos não parecem combinar, já que esse método expressa o propósito de que as teorias físicas sejam consideradas apenas como instrumentos convenientes para a pesquisa experimental. No entender de Duhem, a escola inglesa se preocupa somente com os valores utilitários da teoria física, ao invés daqueles vinculados ao conhecimento teórico (valor de conhecimento) (DUHEM, 1974, p. 319). Essa escola não leva em conta os modelos mecânicos como proporcionando soluções para o problema da identidade do real e do inteligível.

De acordo com Duhem, tais modelos são empregados como soluções para o problema de oferecer instrumentos convenientes para a pesquisa empírica; são meios para agir sobre a natureza, mas não para conhecê-la. Eles são reivindicados, pelos membros dessa escola, na base de proporcionarem poder heurístico. De maneira consistente com sua metodologia, a escola inglesa assume uma visão pragmatista/empirista sobre o valor da teoria física, em cujo interior os modelos possuem um estatuto apenas prático e instrumental. Essa visão, por sua vez, é reforçada pelo fato de que a abordagem metafísico-apriorista sobre a teoria da matéria, subjacente à teoria mecanicista, sofreu diversos reveses, tanto teóricos como experimentais.

Newton e Kant se encontram entre os primeiros a questionar a legitimidade, metafísica e metodológica, das teorias da matéria em explicações mecânicas. Kant, ao longo da segunda antinomia (a propósito da continuidade e descontinuidade da matéria), questiona os elementos *a priori* dessas teorias. Newton critica diretamente o programa cartesiano de formular hipóteses sobre a natureza da matéria. É essa a interpretação de Duhem acerca do significado da célebre máxima de Newton, "*Hypotheses non fingo*".<sup>1</sup> Em meados do século XIX, a ciência experimental mostrou que certas teorias explicativas, tais como as teorias do calórico e a corpuscular da luz, revelaram exemplos de inadequações experimentais. A queda do programa mecanicista de Laplace, o qual se encontrava comprometido com uma explicação causal dos fenômenos físicos, também proporciona evidência empírica para a concepção que considera infrutífero o compromisso ontológico da escola racionalista clássica.

A escola inglesa, em função desses problemas realistas da escola racionalista e de sua origem epistemológica empirista, tradicionalmente suspeita de compromissos realistas de entidades não observáveis, abandona a preocu-

---

<sup>1</sup> Duhem afirma: "Foi precisamente este objetivo [a construção de modelos mecânicos da matéria] que Newton se recusou a empreender ao afirmar sua famosa máxima, 'Não formulo hipóteses' (*Hypotheses non fingo*)". (DUHEM, 1974, p. 324).

pação de conceder um estatuto ontológico às teorias. Associado a esse abandono segue-se aquele do objetivo da unidade lógica da física. O apelo à construção de modelos mecânicos concretos não favorece a unidade lógica de uma teoria física quando identificada a teoria com a construção dos modelos mecânicos concretos. Assim, essa escola rejeita a concepção da teoria física como um sistema racional, assim como aquela que afirma que o objetivo dessa teoria consiste em proporcionar explicações causais dos fenômenos. Ela considera ambos os valores como meramente especulativos e metafísicos. Tais questões metafísicas, como realidade dos modelos e unidade lógica, não devem causar a menor preocupação no interior da física.

A escola inglesa representa uma tendência emergente no século XIX para considerar a abordagem metafísica (método metafísico) e o método experimental como recursos inadequados para examinar corretamente o problema da objetividade (conhecimento teórico) da ciência. Se, por um lado, essa escola jamais admitiu considerações metafísicas como diretrizes para a construção de teorias, por outro, a concepção empirista clássica assume que o método experimental era um procedimento de prova e um instrumento contra a metafísica. Entretanto, em meados do século de XIX, a interpretação da escola inglesa da teoria física, como construção de modelos, indicou a necessidade de uma reavaliação do domínio e do papel atribuído ao método experimental.

No interior dessa escola, articula-se a ideia de que o método experimental não mais é um método de teste e de prova da teoria física. Poincaré que tem dado boas vindas a essa abordagem, tem igualmente questionado o papel do método experimental de ser um método de prova para decidir conclusivamente pela verdade ou falsidade das teorias ou mesmo de proposições. Essa análise aparece principalmente em interpretação de algumas experiências sobre a polarização da luz (POINCARÉ, 1891).

A escola inglesa que tem questionado a ideia de que o método experimental consiste em um meio para decidir o valor de verdade das proposições científicas propõe uma nova interpretação do método experimental como um método para construir leis empíricas e modelos que se assemelham a essas leis, mas não um método de escolha ou de prova. Tais modelos e leis empíricas são interpretados como guias para agir sobre a natureza, ao invés de proporcionar meios para conhecê-la (em seu sentido metafísico).

No entender de Duhem, Poincaré não apenas introduziu essa tendência proveniente da escola inglesa na França, mas, desenvolveu seus pressupostos tanto epistemológicos como metodológicos (DUHEM, 1974, p. 86-93, p. 319).

Evitar essa concepção de teoria física como simplesmente construção de modelos, em particular, modelos mecânicos, é um dos objetivos de Duhem, pois, como mencionado, ela é incompatível com a aplicação do princípio da unidade lógica em física o qual é um dos mais importantes princípios da epistemologia e da metodologia de Duhem, sendo ainda central, por tornar sua concepção rea-

lista, no caso estrutural, possível. Ele deve buscar esse objetivo recuperando o modelo geométrico da teoria mecânica da escola continental (a vertente intelectualista do racionalismo clássico), sem, todavia, se comprometer com o seu inerente aspecto metafísico associado com a demanda por explicações causais.

Duhem deve se equilibrar em sua análise crítica da filosofia mecânica, pois ela é conduzida pela sua ideia reguladora de construir uma concepção da ciência que articula em termos de uma via intermediária (*middle way*) entre a concepção metafísica das explicações causais e as concepções inglesas (pragmatistas/convencionalistas) da construção de modelos, retendo, destas últimas, sua crítica às explicações causais dos fenômenos físicos, porém, recusando a outra ideia de associar a teoria física com a construção de modelos.

O problema central de Duhem que conduz todo seu estudo histórico e filosófico da ciência, no caso, da teoria física, está em como construir uma concepção acerca da natureza das teorias que rejeite, metodologicamente, a busca de causas, portanto, uma explicação metafísica, no sentido do racionalismo clássico, sem se tornar, ao mesmo tempo, uma proposta convencionalista/pragmatista como elabora Poincaré. O emprego do princípio da subdeterminação, tal como preconizado pela escola inglesa, demonstra-se como um recurso metodológico natural em oposição a essa visão explicativa da teoria física.

A estratégia de Duhem é encontrar um recurso metodológico que naturalmente rejeite a concepção da explicação causal da teoria física (seu componente vinculado ao realismo de entidades), sem, contudo, abandonar a aplicação do princípio da unidade lógica. A razão é que tal princípio constitui o núcleo de sua concepção, vinculando a sua interpretação da teoria física como um sistema racional seguindo o modelo geométrico e a sua visão do crescimento científico como racional e contínuo. Esse princípio, além disso, pressiona a busca de teorias físicas cada vez mais amplas, compatível com sua concepção de elaborar uma metodologia para proporcionar decidibilidade e escolha entre teorias, importante para sua concepção do meio termo entre dogmatismo e ceticismo/pragmatismo. O componente metodológico básico dessa estratégia para a articulação de uma via alternativa (*middle way*) é a tese de Duhem (tese-D) (CHIAPPIN, 1989). Essa tese substitui o PSTD da concepção pragmatista sem perder sua força antirrealista (quanto às entidades) e, ao mesmo tempo, permite a aplicação do princípio da unidade lógica que irá conduzir Duhem a defender legitimamente, em termos epistemológicos e metodológicos, uma concepção realista estrutural e convergente da física.

### 3 Alguns problemas da abordagem sintética do mecanicismo

No entender de Duhem, as concepções metafísica e pragmatista/empirista da teoria mecânica estão baseadas em recursos metodológicos para a

construção de teorias que introduzem revoluções e descontinuidades no desenvolvimento histórico. Essas concepções não satisfazem nem o princípio continuidade histórica nem o objetivo de elaborar uma concepção que tem o crescimento científico como racional e contínuo (TA-2). Ademais, segundo Duhem, nem o próprio objetivo último delas é satisfeito: apresentar a teoria mecânica como a estrutura unificadora da física (PUL).

Ambas as concepções originam teorias físicas que se aplicam a pequenos domínios empíricos e não podem proporcionar uma explicação mecânica para mais do que algumas poucas leis. Não podem, além disso, ser estendidas a um grande número destas leis, sem com isso perder seu poder explicativo. Todos esses aspectos são particularmente relevantes, por que iluminam certas características da própria concepção de Duhem. Eles evidenciam, em particular, sua ampla adoção das virtudes do racionalismo clássico, sua nítida tentativa de resgatar o ideal da teoria física como um sistema racional e, em particular, seu compromisso com o princípio da unidade lógica. Eles mostram ainda seu compromisso com a ideia de um progresso racional e contínuo para o desenvolvimento científico.

Da matemática e da geometria, a escola continental herdou a visão de que a física deve se apresentar sob a forma de um sistema racional, um sistema hipotético-dedutivo que procura uma unificação lógica cada vez maior. Entretanto, Duhem argumenta que o componente metafísico de sua concepção racionalista subordina a teoria física a compromissos ontológicos, não permitindo que esta se articule como uma empresa autônoma (DUHEM, 1974, p. 10).

Com efeito, tais compromissos sujeitam-na a diferentes teorias da matéria e da força. Isso produz uma perda de consenso entre os físicos (DUHEM, 1974, p. 10) e, sobretudo, transforma o desenvolvimento científico em “[...] uma série de alterações perpétuas, nas quais uma teoria surge, domina a ciência por um momento, e então sofre um colapso para ser substituída por outra” (DUHEM, 1974, p. 306). A teoria física explicativa, desse modo, não se ajusta ao princípio da continuidade do desenvolvimento científico (TH-2). Duhem salienta ainda que a concepção metafísica não se ajusta à PUL, não obstante a vinculação entre ambas, em virtude de sua base mecânica demasiadamente restrita, e do número crescente de leis empíricas descobertas pelo método experimental. A insistência dessa concepção sobre PUL leva-a a produzir explicações bizarras e de extrema complexidade (DUHEM, 1974, p. 156).

Em oposição ao método sintético de construção de teorias mecânicas, preconizado pela escola inglesa – o método de construção de modelos –, Duhem formula quatro críticas básicas: esse método não se ajusta (i) nem ao princípio da continuidade histórica (TH-2), (ii) nem tampouco ao princípio da unidade lógica (PUL). Ele não se articula com o objetivo do mecanicismo de proporcionar uma estrutura unificadora para toda a física; sua identificação entre teoria física e modelo torna o domínio da primeira, naturalmente limi-

tado. Além disto, (iii) esse método proporciona formas complexas e bizarras de modelos mecânicos, e (iv) não se ajusta a uma teoria física legítima. Ele não se constitui em um método racional de construção de teorias, não as articulando como um sistema racional de classificação. Ao invés disso, trata-se de um método fragmentado de construção, incapaz de estabelecer uma relação rigorosa entre os conceitos mecânicos e a base empírica.

Inicialmente, Duhem argumenta que a estratégia de construção de modelos não se ajusta ao princípio da unidade (PUL), em virtude de sua natureza forçosamente limitada. Ele afirma: “[...] o uso de um modelo definido é necessariamente muito restrito; cada capítulo da física requer a construção de um novo mecanismo que não se conecta com o que serviu para ilustrar o capítulo precedente” (DUHEM, 1974, p. 102).

Ele não pode ser estendido a um grande número de leis experimentais sem arriscar seu próprio poder explicativo, caracterizado pela simulação de mecanismos através de representações claras, concretas e visuais das leis empíricas. Isso ocorre porque esse método almeja proporcionar uma representação figurativa e pictórica dos fenômenos. No entender desse autor, a segunda abordagem de Maxwell da teoria eletromagnética e a teoria do vórtice de Thomson (DUHEM, 1980, p. 89-93, e 1974, p. 83) exemplificam esses problemas. Assim, a elaboração de modelos tem que se restringir a uma explicação mecânica local, isto é, uma explicação de poucas leis empíricas.

Assim, a aplicação desse método na construção de teorias possui como inevitável consequência que se abandone o sonho de uma explicação mecânica completa; requer-se a eliminação do anseio racionalista por uma unidade lógica de toda a física. A escola inglesa, de maneira consistente com o seu método de construção de teorias, compromete-se, no interior da teoria física, com o emprego do princípio da subdeterminação da teoria pelos dados, ao invés do princípio da unidade lógica (DUHEM, 1974, p. 55-104), que será central para defender um valor cognitivo para a ciência por meio da elaboração de uma concepção realista estrutural e convergente (CHIAPPIN, 1989, capítulo III, seção 3.8, [2011]). Poincaré desenvolveu, nesse domínio, ao redor da aplicação desse princípio (PSTD), uma concepção metodológica pragmatista (CHIAPPIN, 1989, 2011) que terá como seu principal oponente Duhem com sua concepção realista. Esse debate sobre a filosofia da mecânica é central no debate epistemológico entre esses dois autores.

Ademais, o autor argumenta que a versão do método sintético baseada na construção de modelos não pode se ajustar ao princípio da continuidade histórica do método científico (TH-2). O uso desse método, por apresentar modelos mecânicos de domínio limitado, introduz descompassos na continuidade histórica, proporcionando uma concepção descontinuista do desenvolvimento da ciência. Isso requer a proliferação de modelos que não são contínuos entre si. Com efeito, para observar esse ponto, basta enumerar os modelos descritos por Thomson.

Não se pode deixar de concordar com Roger Ariew e Peter Barker (ARIEW, 1987, p. 147-148) quando esses autores afirmam que uma crítica fundamental dirigida por Duhem à metodologia da escola inglesa está em apontar o fato de essa não satisfazer o princípio da continuidade histórica (TH-2 e TA-2). Entretanto, eles deixam de considerar outro elemento fundamental da concepção de Duhem acerca do crescimento científico: sua visão da teoria física como um sistema racional. No entender desse autor, essa visão revela-se essencial para aplicar o princípio da continuidade no desenvolvimento histórico da ciência e sustentar a concepção realista estrutural e convergente da física.

As estruturas matemáticas, tais como a mecânica vetorial de Newton, a mecânica analítica de Lagrange e a mecânica de Hamilton, apresentam um desenvolvimento contínuo. Tal desenvolvimento é proporcionado pela generalização e abstração sistemáticas dessas estruturas, tornando-as mais amplas. Esses aspectos do desenvolvimento científico como contínuo e racional, proporcionado pela generalização e abstração sistemática de estruturas cada vez mais amplas e abrangentes, em termos de leis empíricas, são discutidos em outro lugar (CHIAPPIN, 1989). A teoria física no seu desenvolvimento de encontrar sempre estruturas matemáticas mais abrangentes que correspondem a uma classificação natural das leis empíricas tem um valor cognitivo associado exatamente a essa estrutura de ordenamento das leis da física, e nisso consiste o realismo estrutural e, também, convergente de Duhem (CHIAPPIN, 1989, capítulos II e III na seção 3.8).

Outro problema dessa abordagem do método sintético resulta do “caráter temerário” e da “forma bizarra” de seus modelos, bem como “da forma algo pueril do mecanismo” que vincula a base conceitual mecânica às leis empíricas. Por ser limitado, o método de construção de modelos, representado aqui pela construção de modelos mecânicos, não pode se aplicar a diversos fenômenos físicos sem se prestar à introdução de representações incrivelmente complexas e bizarras, destruindo, assim, seu propósito mesmo de proporcionar representações figurativas e visuais. É essa a interpretação, formulada por Duhem, da principal objeção de Newton ao caráter temerário, pueril e bizarro dos modelos (DUHEM, 1974, p. 55-104, e 1980, p. 96).

O comentário de Duhem sobre o trabalho de Maxwell resume seus dois argumentos contrários à escola inglesa, a saber, “[...] as várias teorias do físico escocês [Maxwell] são irreconciliáveis com a doutrina tradicional; elas são irreconciliáveis entre si mesmas” (DUHEM, 1902, p. 11). Nota-se, nesse contexto, que Duhem argumenta contra as teorias de Maxwell por estas não se ajustarem nem ao princípio da continuidade da história do desenvolvimento científico (TH-2), nem, tampouco, ao princípio da unidade lógica (PUL). No entender de Duhem, isso acontece na medida em que tais teorias não incorporam todas as leis empíricas das teorias anteriores.

Além dessa crítica, Duhem insiste ainda no fato de que a construção de modelos não se traduz em um sistema racional. O método racional de construção de teorias proporciona rígidas especificações para introduzir conceitos, propriedades e equações, bem como para estabelecer as conexões entre tais teorias e as leis empíricas. O método de construção de modelos, contudo, não se constitui em um sistema racional de classificação, caracterizado por conceitos, definições e postulados bem estabelecidos, que se articulam de forma a proporcionar uma concepção unificada e organizada da física. Seus recursos metodológicos para a formulação de teorias deixam frouxas as conexões entre modelo e leis empíricas. Os conceitos, equações e propriedades, por exemplo, são introduzidos sem o emprego de definições claras, nem especificações a respeito de como medi-los e interpretá-los (DUHEM, 1974, p. 78-79). Essa objeção se coloca, na medida em que a frouxa conexão proporcionada por esses modelos inviabiliza qualquer controle empírico. Tais características do método de construção de modelos tornam a teoria física não testável, e a aplicação do princípio empirista da testabilidade impossível. Duhem aponta que uma concepção de teoria física, elaborada a partir desse método, revela-se um obstáculo para o progresso científico (DUHEM, 1974, p. 294).

Esse aspecto, de que a construção de modelos não é um sistema racional, pode ser esclarecido, mostrando-se que Duhem não apenas critica o uso de modelos mecânicos, mas também o de modelos algébricos pela escola inglesa. Duhem tem em mente a construção do eletromagnetismo segundo Hertz, em termos das equações de Maxwell. Ele pretende que a teoria física possa ser construída sem tais modelos, e somente com recursos algébrico-matemáticos. Nesse sentido, um modelo algébrico consiste em um conjunto de equações, formuladas com base em tais recursos, sem que, entretanto, restrições racionais sobre os mesmos, sobre o uso dos conceitos e postulados presentes em suas equações, bem como sobre as conexões algébricas entre estes últimos e suas consequências testáveis se encontrem satisfeitas.

Embora Duhem não admita o emprego de tais modelos (algébricos), a legitimidade do uso de sistemas algébricos será por ele defendida. Tais sistemas, no entanto, para que sejam construídos racionalmente, devem satisfazer determinadas condições. Uma delas requer, por exemplo, que

[...] seja estabelecida uma correspondência muito exata e estrita entre os símbolos, ou letras combinadas pela álgebra simbólica, e as propriedades que o físico mede, entre as equações fundamentais que servem como um ponto de partida para o analista e as hipóteses na base da teoria (DUHEM, 1974,s p. 78).

De acordo com Duhem, “[...] estes preâmbulos, devotados à construção das equações de uma teoria física, serão quase sempre buscados em vão nos escritos dos autores ingleses” (DUHEM, 1974, p. 78). Ele cita novamente

Maxwell como um exemplo, na medida em que sua mais importante contribuição para a eletrodinâmica, a saber, o conceito de corrente de deslocamento, é introduzida com a “[...] quase completa ausência de definição” (DUHEM, 1974, p. 79); a razão para isto é clara: “a escola inglesa considera a álgebra como constituindo um componente de um modelo” (DUHEM, 1974, p. 79).

## Conclusão

Apesar das diferenças epistemológicas e metodológicas entre essas duas concepções do método sintético, escola continental e escola inglesa, para construir teorias físicas – uma associada a uma tradição metafísica/racionalista, a outra, a uma pragmatista/empirista –, mostra-se, principalmente segundo a análise de Duhem, que nenhuma delas pode se ajustar a uma concepção que valoriza o princípio da continuidade do desenvolvimento científico, e o objetivo de se proporcionar uma estrutura unificadora para toda a física. Em particular, ele frisa que o método de construção de modelos não é um método racional para construir a teoria física, e, assim, que qualquer teoria construída através dele não é racional. Pelas razões consideradas acima, Duhem requer que esse método seja banido de qualquer concepção da ciência física que admita os princípios da continuidade histórica do desenvolvimento científico e da unidade lógica. Ele pretende que o método sintético de construção de modelos mecânicos seja substituído pelo método abstrato.

Pode-se resumir a crítica duhemiana do método sintético, na perspectiva histórica, assinalando-se que esse não torna o progresso científico contínuo. Um físico, afirma Duhem,

[...] verá as teorias físicas construídas através do método mecanicista] renascendo constantemente, mas constantemente sendo abortadas; [...] parecerá claro a ele que a física do atomismo, condenada a reinícios perpétuos, não tende, através de um progresso continuado, à forma ideal da teoria física” (DUHEM, 1974, p. 304).

Associada a esse reinício perpétuo da teoria física está uma das principais consequências desse modo pragmático de encarar a teoria física: um profundo ceticismo quanto ao papel da ciência de produzir conhecimento objetivo sustentado pelo pessimismo histórico da ascensão e queda das teorias mecânicas conforme o método sintético.

A proliferação de modelos mecânicos, que Poincaré valorizará em termos de riqueza heurística, será um dos recursos de Poincaré para defender sua concepção pragmatista. Em oposição a Poincaré, Duhem argumenta também que tal método não se ajusta ao princípio da unidade lógica, princípio que ele importa do racionalismo clássico. Ele observa que a tentativa de proporcionar,

através do método sintético, a unificação de todas as leis empíricas torna suas explicações sobrecarregadas com combinações arbitrárias e bizarras, como as duas primeiras teorias de Maxwell. Suas palavras são as seguintes:

Cada vez que a feliz audácia de um experimentador tiver descoberto um novo conjunto de leis experimentais, ele verá os atomistas, com pressa febril, apossarem-se deste domínio quase não explorado e construirão um mecanismo representando estes novos achados. Assim, à medida que as descobertas do experimentador tornam-se mais numerosas e detalhadas, ele verá as combinações dos atomistas tornando-se complicadas, tumultuadas, sobrecarregadas com complicações arbitrárias, sem, entretanto, ter êxito em proporcionar uma descrição precisa das novas leis ou em conectá-las solidamente às mais antigas [...] (DUHEM, 1974, p. 304).

Duhem, entretanto, adiciona ainda mais um aspecto à sua crítica do método sintético, a saber, que ela é feita do ponto de vista histórico. Na perspectiva da física contemporânea para Duhem, o enorme número de leis empíricas descobertas através do método experimental torna de fato o método sintético inadequado e insuficiente para satisfazer o princípio da unidade lógica. Ele enfatiza: “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). Aqueles comprometidos com a aplicação do princípio da unidade lógica em física devem abandonar o emprego do método sintético de construir a teoria física. O veredicto final de Duhem apresenta esse ponto com muita clareza:

[...] mas o valor explicativo das teorias mecânicas formadas pela síntese, hoje, parece bastante dúbio. De modo muito claro, parece que cada uma delas é apropriada, no máximo, para representar um minúsculo fragmento da Física; que estas representações fragmentadas podem não estar soldadas umas às outras para formar uma explicação coerente e lógica do Universo inanimado (DUHEM, 1980, p. 100).

A escola inglesa, diante do enorme número de leis empíricas, abandona o princípio da unidade lógica, substituindo-o pelo princípio da subdeterminação da teoria pelos dados, o qual proporciona legitimidade metodológica para seu método. Duhem diria que, nesse caso, eles também deveriam abandonar a possibilidade de explicar racionalmente o crescimento do conhecimento científico, e, em particular, de torná-lo contínuo.

Todavia, a crítica ao método sintético não provém apenas daqueles na tradição da escola continental. Maxwell, que é o principal representante da escola inglesa, traz suas próprias críticas a esse método, decorrentes da insatisfação com suas próprias construções de modelos mecânicos bizarros para atender ao princípio de que toda explicação dos fenômenos físicos deveria reduzir-se às explicações mecânicas segundo o método sintético. O

resultado de suas críticas é concomitante com a disponibilização do método analítico de abordar a mecânica, o qual redundava em relações puramente algébricas, equações de Euler-Lagrange, as quais são equações gerais de sistemas dinâmicos, que podem ser extraídas de princípios puramente matemáticos, como o princípio da mínima ação. A discussão sobre essa abordagem encontra-se em outro artigo que está em processo.

## Referências

ARIEW, R. Duhem on Maxwell: a case-study in the interrelations of History of Science and Philosophy of Science. *PSA 1986*, v.1, p.145-156, 1987.

ARNOLD, V. I. *Mathematical method of classical mechanics*. New York: Springer, 1980.

CHIAPPIN, J. R. N. *Duhem's theory of science: the interplay between Philosophy and history of science*. Ph. D Thesis. University of Pittsburgh. U.S.A. 1989.

\_\_\_\_\_. Racionalidade, decisão, solução de problemas e o programa racionalista. *Ciência e Filosofia*, v. 5, 1996.

\_\_\_\_\_. e LEISTER, Carolina. Uma reconstrução racional do programa de Pesquisa do Racionalismo Neoclássico: Os Subprogramas do convencionalismo/pragmatism (Poincaré) e do realismo estrutural e convergente (Duhem). *Trans/formação*, v. 34, p.103-134, 2011.

DESCARTES, R. *Meditations on first philosophy*. In: COTTINGHAM, J. STOOHOFF, R.; MURDOC, D. (Ed.). *The Philosophical writings of Descartes*. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

\_\_\_\_\_. *The geometry*. New York: Dover, 1954.

\_\_\_\_\_. *La geometria*. México: Espasa-Calpe Argentina. 1947.

DUHEM, P. L'École Anglaise et les Théories Physiques, à propos d'un livre de W. Thompson. *Revue des Questions Scientifiques*, 34, p. 345-378, 1893.

\_\_\_\_\_. *Les Théories électriques de J. Clerk Maxwell. Étude historique et Critique*. Paris: Hermann, 1902.

\_\_\_\_\_. *The aim and Structure of Physical Theory*. Atheneum, 1974.

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

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

MAXWELL, J. C. On Physical lines of forces. In NIVEN, W. D. (Ed.), *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. New York: Dover Publications, Inc., 1952.

\_\_\_\_\_. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. v. 1. New York: Dover, 1954.

POINCARÉ, H. Sur l'expérience de M. Wiener. *Comptes rendus CXII*: p. 325-329, 1891.

\_\_\_\_\_. Les idées de Hertz sur la Mécanique. *Revue Générale des Sciences*. v. 8, p. 734-743, 1897.

\_\_\_\_\_. Sur les principes de la Mécanique. *Bibliothèque du Congrès internationale de Philosophie*, v. 3, p. 457-494, 1900.

\_\_\_\_\_. *Maxwell's theory and Wireless Telegraphy*. New York: Mcgraw, 1904.

VUILLEMIN, J. *Mathématique et métaphysique chez Descartes*. Paris: PUF, 1960.

WESTFALL, R. S. *The construction of Modern Science. Mechanisms and Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.1971.