UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE FILOSOFIA

GUILHERME GRÄF SCHÜLER

QUEM TEM MEDO DE PÊNDULOS?
MODELOS E REPRESENTAÇÃO CIENTÍFICA

PORTO ALEGRE
2021

GUILHERME GRÄF SCHÜLER

QUEM TEM MEDO DE PÊNDULOS?

MODELOS E REPRESENTAÇÃO CIENTÍFICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito à obtenção do título de Bacharel em filosofia.
Orientador: Rogério Passos Severo

PORTO ALEGRE
2021

SCHÜLER, G.G..
Quem tem medo de pêndulos?
Modelos e representação científica/ Guilherme Gräf Schüler. 2021.
44p.;
Orientador: Rogério Passos Severo.
Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

1. Modelos Científicos. 2. Modelos Teóricos e Representacionais. I. Rogério Passos Severo. II. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. III. Departamento de Filosofia. IV. Quem tem medo de pêndulos?
Modelos e representação científica.

TERMO DE APROVAÇÃO

QUEM TEM MEDO DE PÊNDULOS?
MODELOS E REPRESENTAÇÃO CIENTÍFICA

GUILHERME GRÄF SCHÜLER

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em filosofia, considerado aprovado pela banca examinadora e avaliado com nota: _____ em sua defesa.

Rogério Passos Severo
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eros Moreira de Carvalho
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Claudio Ricardo Martins dos Reis
Universidade Federal da Bahia

Porto Alegre, 25 de maio de 2021

AGRADECIMENTOS

Há algo de místico que faz com que conversas sobre Quine, subdeterminação, intraduzibilidade, lógica-matemática e modelos sejam prazerosas e divertidas. Agradeço imensamente ao meu orientador, Rogério Passos Severo, por dedicar seu tempo a essas conversas e a muitas outras: sobre a vida, a filosofia, espiritualidade e sobre as regras para o uso da mesóclise. Foi um prazer tê-lo como orientador, e espero poder continuar como tal de uma forma ou de outra.

Ao meu pai e a minha mãe, agradeço pelo apoio incondicional – sobretudo em meio a tempos difíceis. À minha mãe, agradeço as contínuas expressões de amor, ora camufladas pelo dia-a-dia. Ao meu pai: seu interesse em tudo o que faço não passa despercebido e é uma fonte de apoio imensurável ao qual sou muito grato.

À minha melhor amiga, companheira e namorada, Vitória: os últimos anos vêm se tornando gradualmente melhores à medida que passamos tempo juntos. Por me incentivar a tomar ótimas decisões de vida, pelo gigantesco apoio e por ser a maior fonte de felicidade da minha vida, te agradeço.

Agradeço também aos amigos e professores que me apoiaram durante o curso de filosofia. Conversas após aulas de francês e de história contemporânea, durante jantares no Vale e caronas pós-RU, durante caminhadas rumo ao café da física, durante madrugadas no computador e enquanto tortéis cozinhavam: todas foram importantes de sua própria maneira e mal posso esperar para tê-las todas novamente.

Pode-se construir um mundo totalmente irreal, onde os burros voam e as princesas são ressuscitadas por um beijo: mas é preciso que esse mundo, meramente possível e irreal, exista, segundo estruturas definidas previamente (é preciso saber se, nesse mundo, uma princesa pode ser ressuscitada apenas pelo beijo de um príncipe ou também de uma bruxa, e se o beijo de uma princesa retransforma em príncipe só os sapos ou, digamos, também os tatus). Umberto Eco, "Pós-Escrito a O Nome da Rosa"

RESUMO

Este trabalho oferece uma taxonomia parcial do uso de modelos na prática científica. Distinguem-se dois tipos gerais de modelo: modelos teóricos e representacionais. Modelos teóricos, defende-se, relacionam-se com teorias na medida em que funcionam como estruturas que as tornam verdadeiras; modelos representacionais relacionam-se a sistemas físicos na medida em que os representam. Dentre esses, distingue-se primariamente entre modelos físicos, não-físicos e matemáticos. Apresenta-se também o uso atribuído a modelos durante a evolução de concepções sobre a estrutura de teorias – sintática e semântica. Por último, procuro tornar defensável a concepção semântica de Giere, a saber, de que a relação modelo-sistema deve ser entendida em termos de 'similaridade'.

Palavras-chave: Modelos científicos. Representação. Modelos teóricos. Estrutura de teorias.

ABSTRACT

This work offers a partial taxonomy of the use of models in scientific practice. I distinguish between two major types of model: theoretical and representational. I defend that theoretical models are related to theories to the extent that they function as truth-making structures; representational models are related to physical systems to the extent that they represent them. Among these, I draw a distinction primarily between physical, non-physical, and mathematicals. I also lay out the use ascribed to models during the development of the views concerning the structure of theories – syntaticist and semanticist ones. Lastly, I try to make Giere's semantic conception tenable, namely, that the model-system relationship must be understood in terms of 'similarity'.

Keywords: Scientific models. Representation. Theoretical models. Structure of theories.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

Estou de babá da filha de minha prima e ela parece muito interessada no balanço que temos no pátio. Decido ser uma boa babá e a levo até o balanço. Mas e se o balanço falhar? E se empurrá-la rumo ao chão? Há algumas maneiras de resolver minha dúvida. A primeira que vem à mente é lembrar que um balanço nada mais é que um pêndulo. Seria complicado considerar todas as circunstâncias – o balanço possui dois suportes, o vento sopra, as cordas pesam –, então recordo do modelo do pêndulo simples e minha mente parece clarear.

Segundo esse modelo, um peso no fim de uma corda sem massa é suspenso por um suporte (um pivô) sem fricção. Dado um deslocamento inicial θ, a força gravitacional g e a extensão do pêndulo l, tenho que

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \tag{1}$$

Já que conheço g e l, escolhendo um ângulo θ mínimo, posso calcular o movimento de um pêndulo. Mas, afinal, e a segurança da filha de minha prima? O que o modelo do pêndulo simples me permite dizer sobre como o balanço de meu pátio se movimentará? Embora não seja verdade que o o modelo descreva completamente o cenário do balanço – afinal, o modelo não exaure todas as variáveis –, há ainda alguma relação entre os dois.

A resposta gira em torno da noção de representação. Modelos relacionam-se com o mundo similarmente a mapas, pinturas, retratos: representando. Na comunidade científica, o uso de modelos como instrumentos usados para explicar e predizer aspectos de sistemas do mundo real é generalizado. Filósofos da ciência, no entanto, nem sempre concordaram sobre a centralidade de modelos na prática científica. Até meados do século XX modelos eram vistos como tendo um papel secundário, enquanto teorias eram concebidas essencialmente como conjuntos de enunciados. Como veremos em maior detalhe, sistemas físicos são frequentemente complexos demais para que enunciados de uma teoria (por exemplo, equações) apliquem-se a eles diretamente – vide o balanço em meu pátio. A abordagem subsequente e atualmente predominante na filosofia da ciência defende que modelos e enunciados gerais operam conjuntamente e podem ser igualmente importantes.[1]

Introduzir modelos como itens de igual importância na investigação científica requer também a introdução da relação entre teoria, o mundo e os modelos. Diferentemente de enunciados verdadeiros ou falsos, modelos simplificam aspectos do mundo com determinados propósitos, seja a explicação, predição, ou melhor entendimento.[2] Um bom ponto de partida para a análise

[1] Alguns autores também consideram fatores pragmáticos e institucionais como essenciais à análise de teorias e modelos, ver MORGAN & MORRISON (1999) e WINTHER (2021, S4).

[2] Há mais de uma maneira de se entender o papel de modelos. Distinguir entre elas é alvo deste trabalho. Ver

dessa relação é notar que nem sempre é adequado conceber modelos como possuindo um valor de verdade (não são *truth-apt*) – isto é, não se pode dizer sem qualificações que um modelo seja verdadeiro do mundo ou de um sistema específico. Pode-se falar de modelos em diversos sentidos. Em um sentido, modelos relacionam-se a teorias, tornando-as verdadeiras. Um modelo M, afirma-se, torna verdadeira uma dada teoria T: M é um modelo de T. Em outro sentido, modelos relacionam-se ao mundo representando-o de uma forma ou de outra – embora as condições que algo deve possuir para representar qualquer outra coisa estejam longe de qualquer consenso (SUÁREZ, 2003, p. 225). Diferentes ramificações dessa abordagem selecionam condições distintas.

Este trabalho explora diferentes tipos de modelos na ciência. Em particular, defende-se que as concepções que mais se aproximam da prática científica acerca do uso de modelos e de sua relação com o mundo oferecem melhores ferramentas para uma investigação subsequente. Dentre as concepções aqui apresentadas, seleciono a de Giere – que relaciona modelos ao mundo em termos de'similaridade' – e a defendo em maior detalhe. A primeira seção apresenta uma taxonomia parcial de modelos científicos. Defendo que há uma distinção entre modelos teóricos e modelos representacionais. Modelos teóricos, argumenta-se, funcionam como um tipo de estrutura capaz de tornar uma dada teoria verdadeira. Adicionalmente, distinguo-os da noção mais primitiva de um modelo lógico-matemático. Após isso, apresento três tipos de modelos representacionais, a saber, modelos físicos, não físicos e matemáticos.[3]

A segunda seção contém uma visão geral do papel atribuído a modelos na filosofia da ciência em concepções sintaticistas e semanticistas. Apresentam-se, como ramificações à abordagem semântica, três formas de entender a relação modelo-sistema: como uma hierarquia de modelos, uma relação de isomorfismo ou de similaridade. Defende-se que um esforço para englobar o uso prático de modelos na prática científica rende concepções com melhores ferramentas para entender a relação entre modelos e o mundo. A noção de similaridade é a que mais se alinha a tais práticas. Assim, a defendo em maior detalhe e indico razões adicionais para se adotar a noção de similaridade – ou, ao menos, uma noção igualmente pragmática.

WINTHER (2021).

[3] A análise de modelos aqui proposta não é completa. Ao apresentar modelos teóricos (ACHINSTEIN, 1965), discuto também uma noção lógico-matemática de modelos (THOMSON-JONES, 1997, 2006). A análise de modelos físicos limita-se a modelos de escala (WATSON & CRICK, 1953, ver também, nota 16). Sobre modelos não físicos, menciona-se modelos idealizados – embora grande parte seja dedicada a sua comparação com ficções (para uma maior discussão de modelos idealizados, ver FRIGG & HARTMANN, 2020, e suas referências; ver também, nota 19). A apresentação de modelos matemáticos explora o papel que conjuntos de equações e espaço de estados possuem ao lado de modelos físicos e não físicos. Dos modelos não discutidos neste trabalho, os dois de maior importância – ao meu ver – são 'modelos de dados' e 'modelos exploratórios'. Sobre esses, ver, respectivamente, Leonelli (2019) e Massimi (2019).

2 A SELVA DE MODELOS

Em meados de 1990, uma empreiteira foi contratada para achar possíveis locais para descarte de material radioativo na Pensilvânia. Diversos mapas de escala 1:1.500.000 foram apresentados. Acompanhando os mapas, um relatório afirmava que "pequenas áreas de tamanho suficiente [para a unidade de descarte de material radioativo (UDMR)] podem existir dentro das regiões que aparecem desqualificadas no mapa" (DIBIASE, 2020, cap. 2.6). Verificou-se que a escala utilizada era muito pequena, ocultando justamente as UDMR buscadas. O mapa tinha como objetivo representar algo, mas distorceu o local de tal forma que foi incapaz de realizar tal objetivo. Podemos dizer que o mapa representou mal o local, dado seu objetivo.

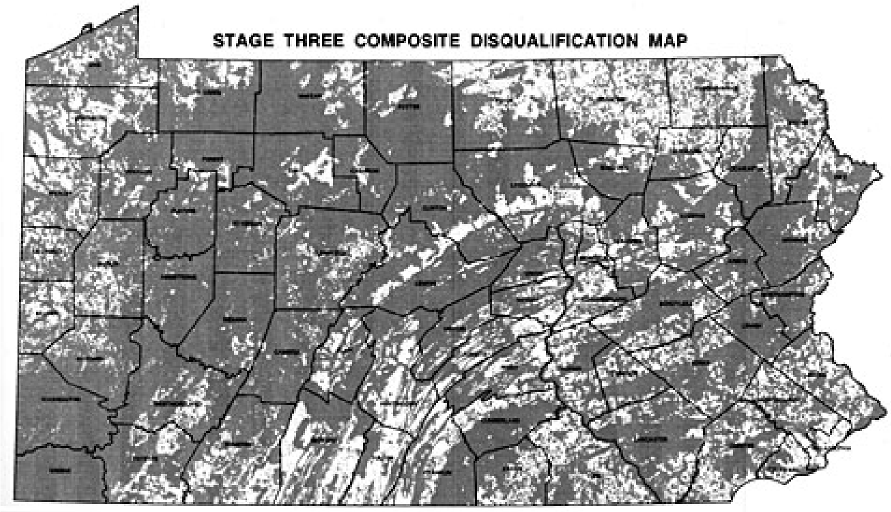

Figura 1 – Áreas (em cinza) desqualificadas como potenciais locais para [UDMRs] representadas em um mapa de escala pequena (1:1.500.000) ocultam pequenas áreas adequadas e grande o suficientes para a unidade de 500 acres.

Que representações distorcem a realidade é algo bem conhecido por filósofos. Em diálogo acerca dos tipos de imitadores, o Estrangeiro de Eleia – junto a seu interlocutor, Teeteto, no diálogo de Platão – nomeia primeiro aquele grupo que busca imitar o mais fielmente todas as dimensões daquilo que buscam representar. Teeteto, surpreso, indaga sobre que outros imitadores há. Esse segundo grupo, prossegue o Estrangeiro, são aqueles:

> (...) que devem modelar ou pintar uma obra de grandes dimensões. Se, na realidade, reproduzissem estas maravilhas em suas verdadeiras proporções, sabes que as partes superiores nos apareceriam exageradamente pequenas e as partes inferiores, muito grandes, pois, a umas vemos de perto, e as outras, de longe. (*Sofista*, 235d-236a)

Representações desse tipo estão por toda a parte e, em boa medida, distorcem seus objetos a fim de cumprirem seus objetivos. O mapa distorce o local para que a localização de UDMRs seja possível; o artista das obras de grande tamanho distorce suas dimensões para que a obra seja bela do ponto de vista daqueles que a veem de baixo. A representação pode vir a ser uma boa ou má representação, dependendo do quão bem corresponde ao sistema representado, mas também da realização de seu objetivo. O mapa correspondia ao sistema alvo, mas não realizava seu objetivo: a visualização de aspectos particulares – a saber, as unidades de descarte. Distorções são admitidas, na medida em que realizam o objetivo da representação.

Entenda-se, de maneira inicial, que um modelo é algo que podemos criar para ganhar mais conhecimento de alguma outra coisa. Para além dos exemplos acima, usamos modelos ao interagirmos com outras pessoas – modelos de seus desejos e gostos, nos quais podemos ignorar aspectos mais complicados de suas mentes. Modelos são uma ferramenta comum a todos. Na prática científica, modelos são usados para compreender, prever e manipular seus sistemas-alvo – partes do mundo em que vivemos –, e a distorção feita por eles se dá via abstrações e idealizações com o fim de descrever e entender o sistema alvo. Que tipos de modelos existem? Como eles se relacionam com o que visam representar?

No topo da taxonomia, pode-se distinguir entre modelos teóricos e modelos representacionais (CONTESSA, 2014). Um modelo teórico, também chamado de modelo de teoria, é uma estrutura que torna certa teoria verdadeira. Nesse sentido, possui uma função similar àquela de um modelo em livros-texto de lógica: uma estrutura da qual uma teoria é verdadeira quando seus termos são interpretados como seus objetos e funções. Um modelo representacional, ou modelo de sistema, é algo usado para representar um sistema dado certo objetivo – por exemplo, a previsão de seus estados futuros.

Uma teoria pode possuir mais de um modelo teórico. O modelo do pêndulo simples é um modelo teórico da mecânica clássica assim como o modelo do plano inclinado. Ambas as estruturas tornam verdadeira a mecânica clássica. Da mesma forma, um sistema pode ser representado por diversos modelos representacionais. Tome, por exemplo, o sistema físico constituído pelo balanço de meu pátio. Uma maneira de representá-lo é o modelo do pêndulo simples (PS). Outra maneira de representá-lo é utilizando o modelo do pêndulo físico (PF, ou pêndulo composto) no qual outras variáveis são consideradas – em especial, o momento de inércia do pêndulo. A escolha entre a utilização do modelo do pêndulo simples ou físico como modelo representacional do balanço em meu pátio pode ser informada: o segundo modelo assume a existência de uma haste com peso suspensa por um suporte, enquanto o primeiro modelo, não. É parte de minha escolha, portanto, avaliar se a corda do balanço em meu sistema físico é melhor representado por PS ou PF. Há mais tipos de modelos representacionais, no entanto. Se eu fosse explicar a situação para a filha de minha prima, afinal, uma boa escolha seria simplesmente mostrar a ela algo pendurado por um fio, tal como um amuleto. Também poderia testar o balanço várias vezes com outro peso, analisar meus resultados e ajustar os dados em uma função, representando o sistema com uma equação.

Modelos teóricos e modelos representacionais não possuem o mesmo domínio, embora possam coincidir: modelos teóricos frequentemente são usados como seus próprios modelos representacionais (vide PS e PF), mas nem todo modelo representacional é um modelo teórico. Canonicamente, PS e PF são classificados como modelos não físicos ou idealizados em razão de não serem objetos concretos em sistemas físicos. O amuleto, ao contrário, é um modelo material composto de objetos encontrados em sistemas físicos. A equação elaborada a partir de uma coleta de dados é comumente chamada de modelo matemático e pode ser utilizada para representar diretamente o sistema alvo.

Modelos representacionais não necessariamente representam um sistema físico real de maneira direta. Meu exemplo pretendia ilustrar um sistema real – o balanço em meu pátio –, mas poderia também ilustrar um *tipo* de sistema real: balanços caseiros, digamos. As próximas seções exploram alguns dos vários tipos de modelos científicos (ver nota 2). Inicio com os modelos teóricos.

2.1 Modelos teóricos

A menção de ‘modelos teóricos’ remonta ao menos ao trabalho de 1962 de Max Black (BLACK, 1962, pp. 219-243): uma primeira tentativa de categorizar diversos tipos de modelos na prática científica. Seu papel, afirma Black, “consiste em introduzir uma nova linguagem ou dialeto, sugerida por uma teoria familiar mas estendida a um novo domínio de aplicação” (BLACK, 1962, p. 229). Tal linguagem, por sua vez, “é a descrição de um objeto ou sistema (ou próprio modelo)” (*ibid.*). Sigo Black ao introduzir esse tipo de modelo via citações de Maxwell sobre a elaboração de sua “teoria do movimento de um fluido incomprimível” (MAXWELL, 1890, p. 160).

Maxwell inicia seu artigo em busca de um processo eficiente para o estudo das ciências. Esse processo deve permitir que os resultados de uma investigação anterior tornem-se mais compreensíveis à mente humana. Um bom candidato ao processo é a simplificação. À primeira vista, a simplificação pode tomar dois rumos: a formulação matemática e a hipótese física. Ambas, no entanto, são limitantes:

> No primeiro caso perdemos totalmente a visão dos fenômenos a serem explicados; e, embora possamos traçar as consequências de certas leis, nunca podemos obter concepções mais estendidas das conexões [do sistema em estudo] (...). Se, por outro lado, adotarmos uma hipótese física, vemos os fenômenos apenas através de um meio e ficamos suscetíveis à cegueira a fatos e à precipitação (...) que uma explicação parcial encoraja. (MAXWELL, 1890, p. 155)

O processo “moderado”, por assim dizer, é aquele que permite à cientista manter uma concepção física clara do sistema, sem “nem desviar-se do assunto (...) por sutilezas analíticas, nem levar-se para além da verdade por hipóteses favoritas” (p. 156). A descrição do processo, em geral, é a atenção à “generalidade e precisão, e [a prevenção dos] perigos resultantes de uma teoria prematura professando explicar a causa e os fenômenos” (p. 159). Seu objetivo está completo se “os resultados da especulação [advinda do modelo] forem de qualquer utilidade para filósofos experimentais na organização e interpretação dos *seus* resultados” (*ibid.*, itálico acrescentado).

Black interpreta esse processo como sendo a elaboração de um modelo teórico. Nele descrevemos algumas entidades – sejam elas objetos e suas propriedades, materiais, mecanismos ou mesmo sistemas inteiros – que pertencem a um domínio científico mais familiar, melhor organizado e relativamente pouco problemático (BLACK, 1962, p. 230). Via regras de correlação, que traduzem afirmações feitas no modelo para o domínio científico mais familiar, inferências válidas no modelo são testadas nesse domínio (*ibid.*). Esse tipo de processo é vantajoso na medida em que pode prover informação (ou mesmo apenas *insights*) sobre o domínio primário, mais familiar: por exemplo, seus termos, seu escopo e suas conexões com outros domínios científicos.

Black oferece um exemplo do uso de modelos teóricos na resolução de um problema matemático. A saber, como dividir um retângulo num conjunto finito de quadrados não sobrepostos e desiguais entre si? Segundo Black, após uma série de experimentos (de tentativa e erro) e computações, a solução tomou forma apenas quando os autores “contornaram” problema (*began to “go round about”*, BLACK, p. 231). Resumindo o processo, ao associar os lados horizontais de um retângulo R e nomeá-los p_1,...,p_n tal que sejam, respectivamente, os vértices superior e inferior de R, pode-se representar R como um circuito fechado de polos p_1 e p_n:

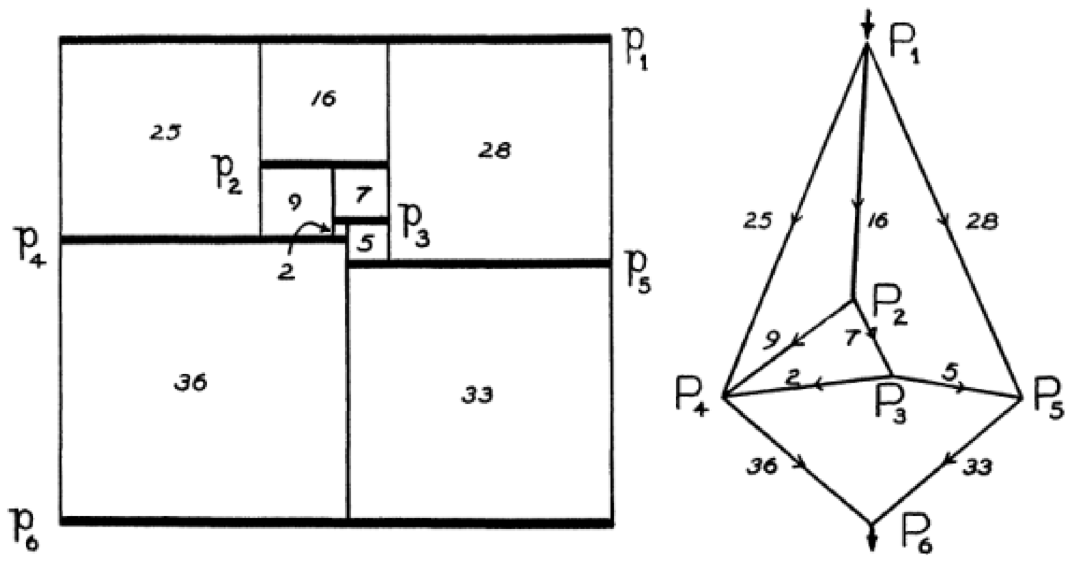

Figura 2 – Retângulo R e sua representação como circuito elétrico (BROOKS et al., 1940, p. 314)

.

Após algumas artimanhas matemáticas (BROOKS et al., 1940, p. 314-15), torna-se possível que a solução para o problema matemático seja encontrado via métodos tradicionais da análise de circuitos. Nas palavras dos autores: “reduzimos o estudo de retângulos quadriculados ao estudo de certos fluxos de eletricidade em circuitos” (p. 315).

A essência de um modelo teórico, na concepção de Black, é que a descrição do domínio que ele oferece é *melhor conhecida* que o domínio a ser estudado. A facilidade dada pelo modelo provém de que nele trabalha-se com um domínio mais conhecido e que há uma maneira de transladar as inferências feitas nesse domínio para o campo de estudo em que o modelo está sendo ativamente usado. No caso acima, um problema novo para o qual seu domínio não parecia prover meios de resolução foi resolvido com o recurso de um modelo teórico, a saber, ao descrever o problema como um problema de análise de circuitos – domínio no qual tanto os termos quanto os métodos de resolução de problemas eram claros – e ao elaborar meios de translado entre esses domínios (ver BROOK *et al.*, pp. 320-23). Uma vez que o problema dos retângulos é resolvido e bem entendido, pode servir de modelo teórico para outras novidades na investigação científica.

A concepção de Black fornece uma imagem geral de um modelo teórico. Ela é, para discussões contemporâneas ao menos, facilmente confundível com outros tipos de modelo, por exemplo, modelos análogos. Nos próximos parágrafos, apresento a concepção de Achinstein (1965) e procuro refinar a noção da qual venho tratando.[1] Inicio com a apresentação de quatro características ditas comuns a todo modelo teórico.

1. Um modelo teórico consiste em um conjunto de hipóteses sobre um objeto (ou um tipo de objeto) ou um sistema (ACHINSTEIN, 1965, p. 103);

2. Um modelo teórico atribui a um objeto (ou um tipo de objeto) ou um sistema uma "estrutura interna" a partir da qual propriedades e mecanismos serão explicados (pp. 103–104);

3. "Um modelo teórico é considerado como uma aproximação útil para certos propósitos" (*ibid.*);

4. "Um modelo teórico é muitas vezes formulado, desenvolvido e até mesmo nomeado com base em uma *analogia* entre o objeto ou sistema descrito no modelo e algum outro objeto ou sistema" (p. 105).

Agora, alguns esclarecimentos. Considere, por exemplo, o "modelo da bola de bilhar dos gases" (p. 103).[2] Tal modelo consiste num conjunto de suposições – hipóteses – acerca das moléculas de um gás ideal. Dentre elas, que as moléculas ocupam um volume desprezível comparado ao volume do recipiente, que não exercem qualquer força entre si a não ser que haja colisão, que tais colisões são perfeitamente elásticas, que as moléculas locomovem-se em linhas retas etc. Adicionalmente, modelos teóricos não devem ser identificados com as figuras, diagramas e eventuais maquetes físicas. Embora tais itens sejam úteis na *apresentação desses*

---

[1] Uma extensão ao trabalho de Achinstein encontra-se no trabalho de Redhead (1980), principalmente a respeito do modo com que aproximações são consideradas (ver pp. 150–158).

[2] Tal modelo é muitas vezes citado na literatura em filosofia da ciência. É interessante notar que o "modelo da bola de sinuca" é frequentemente usado em referência à teoria atômica de Dalton. No uso de Achinstein (o qual será adotado neste trabalho) refere-se à suposição de que, em um gás ideal, moléculas comportam-se de maneira similar à descrição de Dalton. Um gás ideal, por sua vez, é o sistema descrito pela teoria cinética dos gases.

modelos, não constituem a mesma coisa – lembre-se da sutil distinção entre modelos teóricos e representacionais.

O modelo da bola de bilhar dos gases – ou 'modelo dos gases', como o denominarei – atribui a um gás uma estrutura interna específica, a saber, uma estrutura molecular em que a unidade mínima é a molécula ou átomo. Forças intermoleculares tais como a força de Van der Waals – resultantes da estrutura interna do átomo –, por exemplo, são ignoradas (NUSSENZVEIG, 2013b, p. 260). De qualquer maneira, a estrutura molecular atribuída (em contraste, digamos, a uma estrutura submolecular) permite que diversas propriedades sejam derivadas. Dentre elas, a pressão, temperatura e energia interna de um gás. De acordo com Achinstein, a estrutura que um modelo atribui a um sistema deve ser entendida como *referindo-se* às propriedades que visam explicar/derivar, mas não como uma estrutura final (ACHINSTEIN, 1965, p. 104). Esse aspecto *parcial* de modelos, um tipo de modéstia explanatória, é geral quando falamos de modelos científicos.

A introdução de um modelo teórico é geralmente acompanhada por raciocínios do tipo "É útil representar [um sistema] *x* como possuindo tal e tal estrutura, pois daí diversos princípios podem ser derivados, ademais, a verdadeira estrutura que *x* possui é algo parecido com isso, embora muito possivelmente mais complexa (e em vários casos sabidamente mais complexa)" (*ibid.*). Seguindo o exemplo acima, representar gases como um conjunto de moléculas esféricas perfeitamente elásticas cujo movimento é regido pelas leis da mecânica permite derivar, por exemplo, a equação de estados dos gases ideais, a lei de Boyle para gases e a lei de Graham para a difusão.[3] Esse tipo de raciocínio, sugere Achinstein, dá forma a um critério para a avaliação de modelos teóricos. A saber, que um modelo teórico tira seu valor (i) do quão bem serve seu propósito inicial e (ii) da "completude" e precisão de sua representação (*ibid.*).

Além disso, caracterizar um modelo como uma "aproximação útil *a certos propósitos*" sugere sua pluralidade: diversos propósitos, diversos modelos. O modelo dos gases é útil na medida em que serve para derivar leis regendo volume, pressão, temperatura e outras propriedades de gases. Não o é, no entanto, quando há o propósito de estudar propriedades tais como a viscosidade e condutividade térmica – fenômenos presentes na ausência de equilíbrio térmico. Nesses casos, modelos teóricos alternativos são mais úteis na derivação de leis e de explicações.[4] A permissibilidade de modelos teóricos alternativos, note-se, não é empecilho, à primeira vista, para o seu uso recorrente.

Mesmo com essa caracterização, ainda pode ser um problema distinguir entre modelos teóricos e meras analogias. Vejamos dois casos usados por Achinstein, a fim de adequá-los ora como analogias, ora como modelos teóricos. Ambos casos concernem George Fitzgerald – físico do século dezenove – em seus escritos sobre o éter. Em uma formulação de 1885, Fitzgerald escreve sobre um "modelo ilustrando algumas propriedades do éter" (FITZGERALD, 1902, *apud*

[3] Ver NUSSENZVEIG, (2013b, p. 247-8 e p. 250) para as derivações em questão.

[4] Sobre viscosidade e condutividade térmica, ver NUSSENZVEIG, 2013b, p. 35. Para uma introdução, ver WHITE, 2006, pp. 15–31.

ACHINSTEIN, 1965, p. 119). O modelo consistia em uma "série de rodas girando em torno de eixos fixados perpendicularmente em uma superfície horizontal, conectadas por tiras de borracha natural" (*ibid.*). No entanto, o modelo proposto "não pretendia que fosse suposto que o éter fosse de fato feito de rodas e de tiras elásticas, nem mesmo de rodas de pás e canais de conexão". Esse tipo de 'anúncio' de um modelo, segundo o que vimos acima, não se enquadra como um modelo teórico. A estrutura que Fitzgerald sugere não é realmente atribuída ao sistema alvo, nem mesmo como uma aproximação (ver item 2 e 3, acima) – ao contrário, Fitzgerald explicitamente o distancia do que foi dito. Deve ser entendido somente como um análogo mecânico do éter (ACHINSTEIN, p. 119).

Sobre o mesmo assunto, no entanto, Fitzgerald posteriormente escreve:

> ... eu tenho defendido a hipótese de que o éter é da natureza de um fluido cheio de movimentos vorticosos, e que ações eletromagnéticas decorrem de arranjos particulares desse movimento ... O que agora desejo chamar à atenção é para uma hipótese quanto à natureza do movimento de onda que pode ser transmitido por um sistema de filamentos de vórtice. (FITZGERALD, 1902, pp. 472–473, *apud* ACHINSTEIN, 1965, p. 119)

Aqui, a atribuição é efetuada: a estrutura é anunciada como "uma hipótese quanto à natureza". O importante é que modelos teóricos e analogias podem ser distinguidos, embora às vezes somente sob a análise de suas anunciações. Nos casos acima, as suposições eram, ora "pretendidas como modelos teóricos do éter", ora como "descrições de análogos do éter" (*ibid.*).

Por último, será útil distanciar a noção aqui explorada de um modelo teórico de concepções lógico-matemáticas de modelo. Segundo a concepção tarskiana, um modelo é elaborado a fim de prover uma interpretação para um formalismo não interpretado. O modelo, por sua vez, constitui-se de um conjunto de enunciados interpretados derivados dos enunciados não interpretados do formalismo. Esses enunciados interpretados, pode-se pensar, são permutáveis com as 'hipóteses' constituintes de um modelo teórico. Um modelo *à la* concepção lógico-matemática, portanto, nada mais é do que um modelo teórico. Mas esse não é o caso. Vejamos o porquê neste pequeno interlúdio.

Considere uma linguagem de primeira ordem (chame-a, L) que contém apenas dois predicados não lógicos, 'P' e 'Q', sem nenhuma constante ou funções adicionais. Considere agora os três conjuntos, C_1, C_2 e C_3 tais que:

$$C_1 = \{Boldo, Camomila, Hortelã, Hibisco\} \tag{2}$$

$$C_2 = \{Camomila\} \tag{3}$$

$$C_3 = \{Hortelã, Camomila\} \tag{4}$$

Agora, se traçarmos o quantificador universal $\forall$ a C_1 – limitando o universo de interpretação aos elementos de C_1 – e os predicados 'P' e 'Q' respectivamente a C_2 e C_3, temos que {C_1, C_2, C_3} é um modelo do conjunto $\{(\forall)(Px \supset Qx)\}$. Nesse sentido específico, a palavra 'modelo' refere-se a um tipo de mapeamento: o modelo interpreta um formalismo de tal forma que o torne verdadeiro.

Voltemos a atenção para a concepção lógico-matemática. Para isso, tome C_1, C_2 e C_3 como uma tripla ordenada

$$< C_1, C_2, C_3 > . \tag{5}$$

Afirma-se que essa tripla é um modelo do conjunto $\{(\forall)(Px \supset Qx)\}$.[5] A modelos desse tipo pode-se dar o nome de "modelos tarskianos", dado que possuem origem em seus textos (ver, por exemplo, TARSKI, 1953, p. 11). Sigo Thomson-Jones (1997, p. 6), no entanto, ao denominar tais modelos de "estruturas realizadoras" (*truth-making structures, ibid.*).[6] Tais estruturas, note-se, distinguem-se de um simples mapeamento pois não são um tipo de mapa, mas algo alheio que é mapeado a um conjunto de enunciados.

Discursos lógico-matemáticos podem ser levados a um domínio mais geral, indo ao encontro do conteúdo deste trabalho. Uma maneira simples é considerar o conjunto mapeado ao quantificador universal como um sistema físico. Digamos, por exemplo, que o quantificador universal opera sobre circuitos elétricos (THOMSON-JONES, 1997, p. 7-8). Tudo o que é afirmado no escopo desse quantificador, então, afirma-se de circuitos elétricos – um sistema físico, do escopo investigativo das ciências. Podemos, "de forma derivada, falar do próprio sistema, o circuito elétrico (...) como providenciando, ou mesmo sendo um modelo, no sentido de uma *truth-making structure*, do conjunto relevante de enunciados" (*ibid.*)

Alternativamente, podemos afrouxar ainda mais o uso lógico-matemático ao dizer que algo pode ser considerado uma *truth-making structure* se for capaz de tornar verdadeiro um conjunto mais ou menos *interpretado* de enunciados (em português, digamos). Feito isso, um enunciado como (R) admite um modelo do tipo *truth-making structure* (THOMSON-JONES, 1997, p. 8).

(R) Todo resistor aquece quando uma corrente elétrica está o atravessando.

Uma estrutura *truth-making* de (R) é um circuito elétrico tal que, nele, todo resistor aquece quando há uma corrente elétrica atravessando-o. 'Todo', em (R), é tido como referindo-se implicitamente a um circuito elétrico individual na medida em que tal circuito é considerado como seu modelo. "Conforme avançamos de circuito a circuito, perguntando se são modelos

[5] A tripla é também um modelo do conjunto $\{(\forall)(Px \supset Qx), (\forall)(\neg Px \vee Qx)\}$ e assim por diante.

[6] 'Estruturas', pois tais n-tuplos possuem relações entre si – por exemplo, C_1 é um superconjunto de $\{C_2, C_3\}$. 'Realizadoras', pois interpretam um conjunto de enunciados tornando-os verdadeiros.

de (R), estamos constantemente reinterpretando os enunciados de certa forma, apesar de que todo predicado já venha interpretado” (THOMSON-JONES, 1997, p. 8). É nesse sentido que se afirma, acima, que uma estrutura *truth-making* é capaz de tornar verdadeiro um conjunto *mais ou menos* interpretado: os predicados – ‘resistor’, ‘corrente elétrica’, ‘atravessar’, ‘aquecer’ e até mesmo ‘todo’ já vêm interpretados, mas na medida em que se avalia de um circuito se é um modelo de (R), altera-se o domínio de discurso.[7]

Como último passo desse interlúdio, comparemos o que venho denominando de um modelo teórico e o circuito-modelo de (R). Afirmei no início desta seção que o modelo do pêndulo simples (PS) é um modelo teórico da mecânica clássica. Se o que foi dito acima faz sentido, deve ser agora mais fácil entender o porquê disso. Assim é, primeiramente, em razão de consistir por um conjunto de hipóteses sobre um sistema, a saber, de um pêndulo. Dentre eles, citemos as seguintes:

1. O único elemento com massa positiva no sistema é o peso suspenso;
2. A haste é suspensa em um suporte imóvel;
3. O campo gravitacional circundante é uniforme;
4. O movimento ocorre unicamente em dois eixos;
5. O movimento do peso é conservativo; etc.

Essas hipóteses, por sua vez, atribuem ao sistema um tipo de estrutura interna. Por último, o sistema em questão é (i) uma aproximação e (ii) útil para certos propósitos: o cálculo do movimento de pêndulos, em geral. Enfim, o modelo do pêndulo simples encaixa-se elegantemente na definição de um modelo teórico. Já é possível ver, imagino, que o circuito-modelo não está sequer em uma relação similar a do modelo do pêndulo simples. A saber, PS é um modelo (teórico) *da* mecânica clássica – isto é, torna verdadeira partes da mecânica clássica que dizem respeito aos movimentos em questão; ou, dito de outra maneira: a mecânica clássica é verdadeira desse modelo. O circuito-modelo, por outro lado, é um modelo de um enunciado (no caso, relativamente interpretado).[8] Para além disso, não atribui nenhum tipo de estrutura nem apresenta-se como uma aproximação do sistema-alvo. Finalizo, por fim, a distinção entre a noção de um

[7] Embora não seja de grande importância para os objetivos deste trabalho, vale a pena distinguir entre a versão puramente lógico-matemática – de modelos tarskianos – e a versão mais geral de uma estrutura *truth-making*, como faz Thomson-Jones. No primeiro caso, quando afirmamos que $< C_1, C_2, C_3 >$ é um modelo de $\{(\forall)(Px \supset Qx)\}$, invocamos conjuntamente uma noção de interpretação e uma definição de verdade advindas de uma teoria semântica. No segundo caso, quando afirmamos que um circuito elétrico é um modelo de (R), não invocamos quaisquer noções adicionais. De fato, isso nada mais é do que afirmar que um certo circuito elétrico encaixa-se na descrição dada por (R). Não se pode afirmar isso de um modelo tarskiano: não é o caso que $< C_1, C_2, C_3 >$ seja um objeto tal que $\{(\forall)(Px \supset Qx)\}$ – de fato, não há qualquer sentido em tal afirmação (THOMSON-JONES, 2006, p. 525-7). Como esclarecimento, Thomson-Jones sugere denominar o primeiro tipo de estrutura como ‘interpretadores sérios’ e o segundo de ‘meros enquadradores descritivos’ (*ibid.* ‘*serious interpreters*’ e ‘*mere description fitters*’, respectivamente).

[8] É possível que, se considerarmos uma teoria como um conjunto de enunciados interpretados (ou não interpretados, ou mais ou menos interpretados...), o circuito-modelo e o modelo de PS se assemelhem nesse quesito. Note-se, no entanto, que nada sobre a estrutura de teorias foi dito até aqui: tal discussão é alvo da seção seguinte

modelo teórico daquela de um modelo tarskiano – tanto em sua versão lógico-matemática quanto na versão estendida.

Lembre da relação entre um modelo teórico e as analogias que eram ora apresentadas simultaneamente. Thomson-Jones comenta essa relação entre modelos teóricos e analogias (THOMSON-JONES, 1997, pp. 13–15)[9]. Um tipo de relação ocorre quando o modelo é elaborado em analogia a algum outro modelo relativo a outro sistema-alvo. Pode também ser o caso que o modelo seja elaborado tendo em vista uma analogia entre o *seu* sistema-alvo e qualquer outro sistema. O ‘modelo da bola de bilhar dos gases’ ilustra essa relação: a estrutura de seu sistema-alvo – gases – é tida como similar a de várias bolas de bilhar. Dessa segunda relação pode-se tirar o diagrama ilustrado pela figura 2.

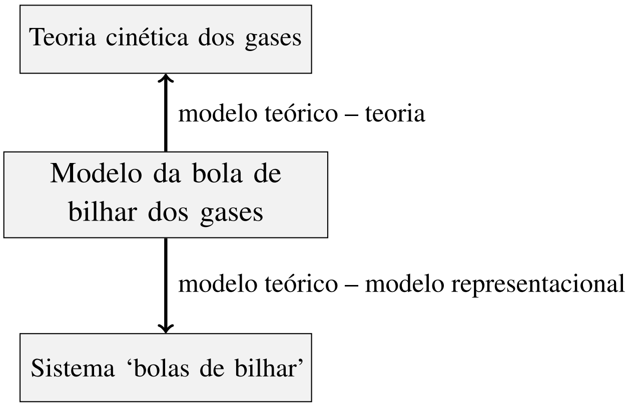

Figura 3 – Relação modelo – teoria – representação

O terceiro bloco – ‘sistema bolas de bilhar’ – integra o campo dos modelos representacionais. A conexão entre o modelo teórico e o modelo representacional, sugiro, é a de que o modelo representacional instancia de certa forma a estrutura que um modelo teórico atribui a seu sistema-alvo. No caso, um sistema ‘bolas de bilhar’ instancia as propriedades (ou, ao menos, algumas) que o modelo teórico postula. Dentre os tipos de modelos representacionais pode-se citar modelos físicos, não físicos e modelos matemáticos. Como já foi dito, alguns modelos teóricos funcionam como seus próprios modelos representacionais. No caso em questão, o próprio modelo teórico sugere um modelo representacional: o modelo idealizado de uma ‘bola de bilhar’, ou, na escala de seu propósito, uma mesa de bilhar. Não raramente, no entanto, um sistema-alvo é representado por um modelo matemático. Por exemplo, pode-se afirmar que o movimento de tais e tais entidades evolui segundo esta ou aquela equação. Também é o caso que um sistema possa ser representado por uma estatueta ou maquete. No que se segue, apresento-os em maior detalhe.

9 Thomson-Jones (1997, *preprint*) utiliza-se da noção de modelo teórico de Achinstein (1965), embora sua caracterização seja menos específica e denominada “modelo proposicional”.

2.2 Modelos representacionais

Vamos direto à questão, que tipo de coisa é um plano inclinado sem atrito? Certamente, é um plano. Além disso, possui uma inclinação não-nula. Mas há algo mais aí. O que, *realmente*, é um plano inclinado sem atrito? Se isso já parece excêntrico, o que então dizer de um pêndulo simples? Ele é imperecível, invisível, inestimável e até mesmo indestrutível.

Podemos afirmar coisas dele e desenhá-lo, por exemplo, mas ele não existe da mesma maneira que um relógio, um balanço ou um amuleto. Há algumas equações que frequentemente vêm juntas à apresentação de pêndulos. Por exemplo:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \tag{6}$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{\ell}\sin\theta = 0, \theta = \text{deslocamento angular} \tag{7}$$

No entanto, tais equações não são o mesmo que o pêndulo simples. Se o pêndulo simples obedece a tais equações, é em razão das propriedades que ele possui. A estranheza de sua natureza, sugiro, vem do fato de que, à primeira vista, pêndulos simples e planos inclinados não são objetos concretos – ao menos não da mesma maneira que relógios, balanços, amuletos, computadores e xícaras.

Objetos desse tipo, dos quais se afirma que possuem propriedades comuns à maioria dos objetos do mundo, mas que não existem da mesma maneira que objetos 'concretos', são frequentemente denominados de objetos não físicos. Quando um objeto não-físico[10] é usado para representar algo, chamá-lo-emos de um *modelo não-físico*. Do contrário, *modelo físico*. Por último, se a representação é feita por um objeto matemático, então o denominamos um *modelo matemático*. O que os três tipos de modelo possuem em comum é que são usados para transpor aquilo que é dito por um modelo teórico para o seu sistema físico alvo. Chamá-los-ei, como já foi dito, de modelos representacionais – em contraste com modelos teóricos. Apresento-os a seguir.

2.2.1 Modelos físicos

Laboratórios estão cheios de modelos físicos: *concreta*, objetos tridimensionais.[11] Esses tipos de modelos são em geral úteis na apresentação de itens em domínios investigativos: órgãos, polímeros, moléculas, células, aviões, navios, etc. Considere, por exemplo, o vírus da gripe (Influenza). A superfície exterior do virião é coberta por um envelope lipídico. Nela, há proteínas

---

[10] Sim, algo que é tanto um objeto quanto algo não-físico soa estranho. Com sorte, a expressão será esclarecida nos próximos parágrafos.

[11] Ao usar palavra 'físico', não pretendo qualificar tais modelos a objetos de uma teoria física. Poderia também usar o termo 'material'. Aqui, sigo a nomenclatura de THOMSON-JONES (1997) e FRIGG & HARTMANN (2020).

do tipo M1 e M2. As proteínas alongadas são hemaglutinina (HA) e neuraminidase (NA). O genoma – parte interna – constitui-se de 8 segmentos de RNA. A figura (E) a seguir é um esquema dessas e de outras propriedades.

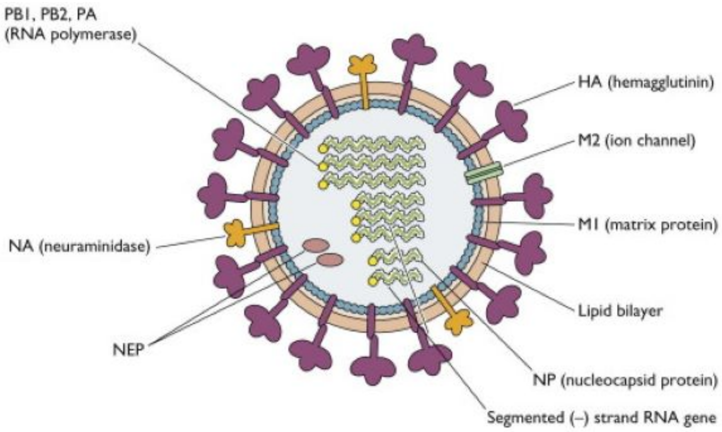

Figura 4 – Esquema representativo da estrutura do virião do vírus de Influenza A (FLINT et al., 2000) (E) e cápsula-modelo do vírus Influenza (ver nota 11) (D)

Por si só, a figura não constitui um modelo físico. Facilmente, no entanto, encontramos réplicas.[12] Uma simples pesquisa rende, por exemplo, a réplica (D)[13]. Representa-se, em amarelo, o envelope; em roxo, rosa e azul, respectivamente, as proteínas hemaglutinina e neuraminidase e M2. Dentro da cápsula, encontram-se os 8 segmentos de RNA, alguns vermelhos, alguns amarelos, representando que o vírus acaba de passar por um processo de rearranjo.

Outro modelo material é o modelo do DNA como uma "estrutura com duas cadeias helicoidais cada qual enroscada em volta de um mesmo eixo" (WATSON; CRICK, 1953, p. 737). Modelos desse tipo, caso ao nosso alcance, podem ser tocados, manuseados e eventualmente quebrados. É importante notar que sua função – para além da representação – não é apenas expositória, mas também exploratória. A construção do modelo do DNA, por exemplo, foi resultado de diversas tentativas em elaborar um modelo físico coerente com as informações previamente obtidas por cristalografia de raio X (THOMSON-JONES, 1997, p. 17).[14] O papel exploratório deve-se, penso, a recorrente comparação entre um novo modelo físico e o prévio.

12 Mary Hesse é conhecida por escrever sobre modelos físicos – réplicas (HESSE, 1970). Sob sua concepção, modelos físicos – ou, em sua nomenclatura, analogias materiais – são modelos em razão de relações de analogia com o sistema representado. Uma analogia positiva é algo que ambos o modelo e o sistema possui, por exemplo, o fato de que ambos o Sol e a Terra são corpos mais ou menos esféricos que exercem e recebem efeitos gravitacionais. Uma analogia negativa é algo que apenas um dos dois possui, por exemplo, emissão de luz própria. Analogias neutras são sobre propriedades cuja instanciação no modelo ou sistema desconhecemos. Falar de analogias positivas, negativas e neutras é útil na literatura sobre modelos. Não usarei esse vocabulário, mas o leitor pode ficar à vontade para fazer as conexões.

13 Disponível em <https://www.3dmoleculardesigns.com/Education-Products/Influenza-Virus-Capsule.htm>

14 Atribuir o descobrimento da estrutura e função da molécula do DNA unicamente a Watson e Crick é um erro. Sobre o papel de Friedrich Miescher, Phoebus Levene, Erwin Chargaff, Rosalind Franklin e Maurice Wilkins, ver PRAY (2008).

Modelos físicos podem representar, ao menos, três tipos de fenômeno: sistemas-tipo, sistemas-particulares e processos.[15] O modelo de DNA representa a estrutura de um tipo de sistema, a saber, um tipo de molécula. Modelos físicos também podem representar um sistema particular. Considere, por exemplo, o modelo da baía de São Francisco (USACE). Como o nome sugere, consiste em um modelo físico da baía de São Francisco (a partir daqui, bSF) de mais ou menos $4000m^2$, construído com 286 lajes de concreto, situado dentro de um armazém para fins de preservação. O modelo inclui os canais de navegação, rios, correntes, ancoradouros, portos, diques, etc., para que a vazão de água seja reproduzida o mais fielmente possível. Isso leva-nos ao último tipo de fenômeno representado por um modelo físico: processos. Para além da vazão de água, o modelo bSF costumava simular correntes fluviais, salinidade e até mesmo o impacto de atividades agrícolas. Atualmente, simula-se ativamente os efeitos da maré na baía. Para isso, o modelo conta com um gerador de maré tal que

> As marés eram geradas por um fluxo contínuo entre um grande reservatório e a cabeceira do oceano (*ocean headbay*, uma porção do oceano diretamente acima de uma barragem). O fluxo de entrada foi alcançado usando uma bomba de 55.92kW em uma linha de uma válvula de controle de 35.56cm. O fluxo de saída foi [alcançado] pela gravidade através de um tubo de 60.96cm com um controle de comporta deslizante em uma seção de controle da barragem do reservatório. (*ibid*., Operation/Tide Generator)

Simulações desse tipo são interessantes na medida em que mostram como modelos físicos podem, e frequentemente são, mais do que meros instrumentos didáticos. Já foi dito – do modelo de Watson & Crick – que modelos físicos podem auxiliar na elaboração de novas hipóteses. As simulações das quais falo reforçam essa afirmação: modelos ‘prontos’, ou completos, podem ser colocados em uso na experimentação e aquisição de novos dados. O modelo bSF faz justamente isso:

> Todos os dados coletados no sistema automatizado são corrigidos com base na curva de calibração de cada instrumento e convertidos para o parâmetro apropriado. Todos os dados brutos (*raw data*) são armazenados antes da correção, permitindo ajustes (...). Os dados podem ser apresentados como pontos individuais ou média. (...). (*ibid*., Data Processing/Applications of the Model)

As informações adquiridas foram usadas para avaliar “mudanças hidráulicas ocasionadas por planos de barragem diferentes”, “problemas com a qualidade da água associados com padrões de circulação”, etc. Os objetivos do modelo, note-se, obviamente não pretendiam limitar-se ao modelo, mas sim ao seu sistema-alvo, o que o modelo representa: a baía de São Francisco.

O que há de importante aqui são as distintas funções que um modelo material pode possuir – e que, frequentemente, *simultaneamente* possuem. Ao menos três funções foram

[15] Thomson-Jones (1997) menciona uma quarta possibilidade: “alguns modelos físicos (...) podem ser projetados como representações de um tipo não instanciado” (p. 19). Seu exemplo é o modelo de um universo bidimensional cuja geometria é não-Euclidiana. Tal modelo consiste em uma placa de metal aquecida “de tal maneira que a temperatura aumente radialmente do centro” e de réguas que se expandem com o aumento de temperatura. O estatuto preciso de tais modelos pode ser algo interessante, mas será ignorado neste trabalho.

apresentadas. Primeiro, um modelo físico pode ser utilizado com propósitos didáticos: o modelo do Influenza e do DNA no ensino em laboratório e o modelo bSF para entusiastas de engenharia. Segundo, com uma função exploratória: o modelo do DNA e do bSF e seu gradual aperfeiçoamento, na medida em que procurava-se representações mais fiéis de seus sistemas-alvo. Por último, como um item ativo na experimentação e eventuais predições transpostas ao sistema-alvo: o modelo bSF e a coleta diária de dados acerca do nível de maré, da salinidade da água, sua temperatura, velocidade e circulação.[16] Esses, assim, constituem um primeiro tipo de modelo representacional. Sua característica central é a de que representam um sistema qualquer por um meio físico. Mas, 'meio físico' em contraste com o quê?

2.2.2 Modelos não físicos

Modelos não físicos incluem os familiares modelos de um sistema massa-mola com um grau de liberdade, o modelo do pêndulo simples, do plano inclinado sem atrito, etc. Chamo-os de modelos não físicos em razão de que não parece existir objetos desse tipo em nosso universo. Molas não possuem apenas um grau de liberdade, elas oscilam em diversos eixos; pêndulos não possuem pesos puntiformes, sua massa é distribuída; planos inclinados sem atrito não existem. O fato de que podemos escrever sobre esses modelos e frequentemente encontramos diagramas e imagens que os representam, mas que eles não existem da mesma forma que objetos físicos, assemelha-os a um tipo de objeto comum à filosofia: objetos fictícios. Nesse sentido, um plano inclinado sem atrito e Macunaíma não são tão diferentes quanto parecem. Dizemos de ambos que não existem, embora possamos afirmar coisas deles: um não possui atrito, o outro nasceu da tribo tapanhumas. Além disso, possuem autores. Planos inclinados sob 'condições ideais', por exemplo, foram apresentados e explorados por Galileu, em seu *Discuso sobre as novas ciências* (GALILEU, 1914, pp. 160–244); Macunaíma, por sua vez, é produto de Mário de Andrade.

Boa parte da literatura sobre modelos não físicos concerne o seu estatuto ontológico: se são ficções, são idênticos às ficções produto de Mário de Andrade, ou há algo de diferente? Se não são ficções, o que são?, etc. Comentarei essas questões, mas o mais relevante aqui é notar o papel de tais modelos. A saber, esse é o tipo de modelo em questão quando afirmo que modelos teóricos frequentemente são usados como seus próprios modelos representacionais. O que foi dito sobre modelos teóricos, assim, aplica-se à função geral de modelos não físicos. Dito isso, que tipo de coisa é um modelo não-físico? Apresento três possíveis respostas: a versão dualista, artefatualista, e abstrativista. Uso a resposta abstrativista como um meio para se livrar de questões metafísicas acerca de modelos.

Antes de tudo, discussões sobre objetos fictícios costumam adotar um vocabulário comum, que nos será útil. 'Frases externas' e 'frases internas' sobre um objeto fictício são,

[16] Um exemplo adicional e comumente citado é o de túneis de vento – nos quais simulam-se o funcionamento de aviões, pontes, edifícios, etc. Mais sobre como modelos físicos – ou, modelos de escala – são elaborados e usados na experimentação e coleta de dados pode ser encontrado em Sterrett (2020).

respectivamente, frases que falam desse objeto (i) *como um modelo* ou (ii) *como um sistema concreto*. Considere, por exemplo, as seguintes frases:

1. "O modelo do átomo de Rutherford foi criado por Ernest Rutherford na virada do século XX". (CONTESSA, 2009, p. 224)
2. "No modelo do átomo de Rutherford, elétrons orbitam em volta do núcleo em órbitas bem definidas". (*ibid*.)

Frases externas, como (1), possuem seu valor de verdade atrelado a como as coisas no mundo ocorrem – no caso, a história da ciência e a autoria ou não do modelo à Rutherford.[17] Atribuições de valor de verdade de frases do tipo (2) são menos simples. Se submetido a um teste de química, estudantes ganhariam pontos ao afirmar que (2) é uma frase verdadeira. Ao mesmo tempo, no entanto, sabemos que os elétrons e núcleos mencionados não existem no mundo – nesse sentido, a frase é falsa. A situação é a de que, "enquanto (2) pode não ser literalmente verdadeira, há um sentido no qual gostaríamos de dizer que é".

A versão dualista, proposta por Contessa (CONTESSA, 2009), sustenta que um modelo não-físico – no sentido aqui dado – é "um objeto abstrato que representa (*stands for*) um ou outro conjunto de sistemas concretos possíveis" (p. 224). Nessa versão, a frase (1) é verdadeira pois o modelo do átomo de Rutherford – um objeto abstrato –, de fato, foi criado por Rutherford. A frase (2), por sua vez, é falsa, pois o modelo – novamente, o objeto abstrato – sequer possui quaisquer elétrons ou núcleos. Mas há um truque:

> Mesmo assim, em algumas circunstâncias, [o modelo] atua como um substituto (*acts as a stand-in*) para um dos possíveis sistemas que contêm um elétron orbitando em volta do núcleo em órbitas bem definidas e, assim, (2) pode ser considerado como verdadeira em algum sentido. (*ibid*, p. 224)

A escolha de palavras é proposital: o ato de falarmos de atores *como se fossem* as personagens de um filme – embora, geralmente, saibamos que o que falamos não seja verdadeiro *dos* atores – é tido como semelhante ao ato de falarmos de modelos. O que Rutherford fez quando deu à luz seu modelo do átomo, segundo Contessa, foi descrever um sistema – um sistema possível. O modelo é um objeto abstrato que *substitui* o sistema possível. Alguns esclarecimentos ontológicos são bem-vindos e, de fato, mencionados por Contessa (p. 225). Primeiro, adotar uma versão dualista de modelos não físicos implica adotar uma ontologia tanto de objetos possíveis quanto de objetos abstratos. Segundo, isso não é tão assustador quanto parece: afinal de contas, se falamos de objetos possíveis e abstratos, *precisamos* ter uma explicação filosófica disso, não? Por último, a noção de 'substituir' é pretendida como uma noção comum à filosofia: o objeto abstrato (o modelo) substitui um sistema possível assim como cinco dedos em uma mão podem

[17] Suponho uma teoria correspondentista. O que se segue, no entanto, não parece depender da adoção de uma teoria de verdade particular.

substituir cinco objetos contados ou como o azul em um mapa substitui um corpo de água. Passemos à versão artefatualista.

Advogada por Thomson-Jones (2020), uma versão artefatualista sobre modelos não físicos[18] afirma que os sistemas que um modelo não-físico representa são artefatos abstratos. Isso é dizer que pêndulos simples, por exemplo, são artefatos abstratos, "criados por físicos em um certo ponto (...) na história da mecânica clássica" (THOMSON-JONES, 2020, p. 86). As 'ficções' propostas acerca desses artefatos – os modelos não físicos – podem ser alvo de dois tipos de pronunciamentos (*utterances*): fictícias e metafictícias. Pronunciamentos fictícios compõem o modelo (tais como as hipóteses compunham os modelos teóricos de Achinstein); pronunciamentos metafictícios são declarações acerca do conteúdo do modelo, sem necessariamente reconhecer o seu aspecto fictício. Disso, depreende-se a seguinte caracterização do artefatualismo:

1. Quando pronunciamos o enunciado "Pêndulos simples movem-se sinusoidalmente" metaficticionalmente – digamos, como parte de um discurso envolvido na modelagem de uma ponte oscilante como um pêndulo simples – o termo "pêndulo simples" seleciona uma classe de artefatos abstratos criados por físicos em um certo ponto da história da mecânica clássica. Vamos dar a esses artefatos abstratos outro nome e chamá-los de "os AA_1s".
2. Pronunciamentos do termo "pêndulo simples" em uma apresentação inicial da noção de um pêndulo simples (isto é, pronunciamentos fictícios do termo) selecionam a mesma classes de artefatos abstratos.
3. O pronunciamento metafictício faz a declaração de que aqueles artefatos abstratos são tais que, de acordo com a ficção do pêndulo simples, eles se movem sinusoidalmente.

(THOMSON-JONES, 2020, p, 87)

Enfim, pronunciamentos acerca do pêndulo simples quando efetuados em um discurso sobre modelagem são verdadeiras. Falar que pêndulos simples movimentam-se sinusoidalmente, por exemplo, é afirmar que certos artefatos abstratos são de certo tipo tal que, segundo a ficção do pêndulo simples – ou, simplesmente, o modelo não físico do pêndulo simples – movimentam-se sinusoidalmente. Tal afirmação, por sua vez, é verdadeira se considerada como um pronunciamento metafictício. Para finalizar essa apresentação, considere uma possível objeção. O enunciado "pêndulos simples movem-se através de um campo gravitacional perfeitamente uniforme", quando encontrado na descrição inicial de um pêndulo, expressa que os AA_1s movimentam-se através de tal campo gravitacional; no entanto, AA_1s são objetos abstratos e, portanto, não se

[18] Thomson-Jones não utiliza o termo modelo não-físico, nem sequer o comumente adotado 'modelo fictício'. Em vez disso, denomina-os 'sistemas ausentes' (*missing systems*. Enquanto comentar sobre a versão artefatualista, usarei seu termo. Uma descrição de um sistema ausente ocorre quando um discurso "(i) possui a aparência de ser a descrição precisa de um sistema real, concreto (ou tipo de sistema) do sistema de inquérito, mas (ii) na verdade não há qualquer sistema real, concreto, no mundo em nosso volta que se enquadra na descrição, e (iii) esse fato é reconhecido desde o início pelos praticantes competentes da disciplina científica em questão" (THOMSON-JONES, 2009, p. 283).

movimentam de tal forma (THOMSON-JONES, 2020, p. 91). O enunciado, portanto, é falso. O que o proponente do artefatualismo deve fazer para contornar o problema, no entanto, é simples o suficiente: tais enunciados, se pronunciados metaficticionalmente, são, na verdade, verdadeiros. De fato, enunciados desse tipo são, quando considerados como metafictícios, verdadeiros: expressam que uma propriedade x é atribuída aos AA_1s pelo modelo do pêndulo – a propriedade de movimentar-se através de um campo gravitacional uniforme é uma delas (*ibid.*). Isso não é dizer que o modelo do pêndulo é verdadeiro, apenas que certos enunciados *a respeito* do modelo são. Modelos continuam a não possuir um valor de verdade.

Por fim, a versão abstratualista de Giere. Não tão distintamente das versões anteriores, Giere afirma que modelos são entidades abstratas, cujas propriedades são inteira e unicamente atribuídas pela comunidade científica (GIERE, 1988, p. 78). São, em essência, entidades fabricadas. Comecemos do simples: entidades abstratas são entendidas aqui como fabricações humanas, concedidas pelo uso da linguagem e da matemática. Mas também não são, nem palavras, nem equações, nem qualquer simbolismo formal. Elas devem ser entendidas como tão familiares quanto um plano de passeio ao shopping: o plano é uma entidade abstrata assim como um modelo científico– embora modelos possam ser um pouco mais complicados (GIERE, 2004, p.747, n. 7).

Acima de tudo, o abstratualismo de Giere é uma resposta ao movimento de equiparar modelos não físicos com ficções. O cerne dessa posição é a de que trabalhos de ficção tais como Macunaíma e modelos não físicos tais como o pêndulo simples são ontologicamente similares, mas drasticamente distintos em função. Essa diferença, por sua vez, é suficiente para procurarmos outras abordagens em relação a tais modelos. Penso que esse seja o ponto de partida do abstratualismo: a função do uso de modelos deve ser considerada quando teorizamos sobre sua ontologia.

Trabalhos científicos que elaboram novas ideias e conceitos são listados como não fictícios. Trabalhos de ficção científica são, adequadamente, listados como fictícios. Trabalhos tratando sobre membranas mutidimensionais que vibram, quando publicadas por autoridades científicas cujo propósito é descrever aspectos *do mundo em que vivemos*, são listados como não fictícios (GIERE, 2008, p. 251). Imaginar um cenário no qual luz viaja no espaço completamente vazio pode ser boa ciência; imaginar a nave *Enterprise* viajando à 'velocidade da luz', não. Falar de modelos não físicos como ficções "oblitera essa distinção bem fundamentada" (*ibid.*). Ademais, trabalhos de ficção não parecem possuir uma função única: alguns podem buscar apenas entreter, outros sequer ter uma função. Seja lá a função – ou sua ausência – que Mário de Andrade (ou seus posteriores críticos) intencionavam para Macunaíma, não é óbvio que exista uma função *em comum* entre esse trabalho de ficção e todos os outros. Modelos científicos, embora possam possuir objetivos particulares distintos, compartilham de uma função: a representação de aspectos do mundo. Pode-se criticar um modelo – e possivelmente ajustá-lo – por deturpar demasiadamente o sistema que busca representar. É bizarro, por sua vez, criticar uma obra de ficção pelo mesmo motivo: por exemplo, "não é uma crítica aos livros do Harry Potter dizer que não há uma comunidade genuína de bruxos" (p. 252). Similarmente, não é uma crítica ao Macunaíma dizer que um papagaio nunca conseguiria contar uma história tão complexa.

O golpe final a uma noção fictícia de modelos surge da discussão de Giere acerca do 'argumento do encaixe imperfeito'. O argumento parte do fato de que a maioria dos modelos não físicos não exibem um encaixe perfeito com quaisquer sistema real que pretendem modelar – como já vimos, o mundo não admite massas puntiformes e planos sem atrito. A resposta de Giere é a de que isso nada diz sobre o *bom* encaixe entre modelos e o mundo – modelos fazem um bom trabalho na representação de seus sistema-alvo, embora reconhecidamente imperfeito.[19] Considerar o 'bom encaixe' de modelos como funcionalmente idêntico (ou mesmo similar) a trabalhos de ficção, prossegue Giere, viola a prática científica. "Idealizações, abstrações e aproximações, sim. Ficções, não" (GIERE, 2008, p. 254).

Talvez a confusão esteja no grau de precisão que um trabalho representacional necessite ter para ser chamado de científico, diferentemente da ficção. Pode-se pensar que representações devem ser perfeitas a fim de qualificarem-se como trabalhos de não ficção. Pensar assim não nos leva muito longe, no entanto. Boa parte de nosso empreendimento comunicativo consiste em idealizações, em representação brutas: estereótipos sendo o caso paradigmático. São os produtos da comunicação trabalhos de ficção? Sigo Giere ao sugerir que não. Representações podem qualificar-se como boas ou ruins em diversos graus. Não serem perfeitas não as qualificam como ficções.[20] Modelos não físicos (e modelos em geral) são criações da imaginação de agentes, seja individualmente ou como uma comunidade: "não possuem qualquer estatuto ontológico para além disso" (GIERE, 2010).[21] A próxima seção explora modelos matemáticos, comumente apresentados em conjunto com modelos não físicos.

2.2.3 Modelos matemáticos

Sugiro entender modelos matemáticos como contrapartes dos modelos acima descritos. Geralmente, modelos matemáticos tomam a forma de equações, ou conjuntos de equações, cujas variáveis possuem contrapartes no modelo não-físico. O modelo logístico de crescimento populacional, por exemplo, é frequentemente apresentado como a seguinte equação:

$$\frac{dN}{dt} = rN(1 - \frac{N}{K}) \tag{8}$$

[19] O argumento de Giere limita-se àqueles modelos bem sucedidos. Bons modelos fazem um bom trabalho. Há o caso em que um modelo não faz um bom trabalho na representação de seu sistema-alvo – tornando-o um mau modelo, sujeito a ajuste e possível rejeição. Ambos os modelos, no entanto, são construídos visando a boa representação.

[20] Para outra defesa de modelos como não-ficções, ver Ducheyne (2008).

[21] Um tipo específico de modelo não físico é aquele de um modelo mínimo. Batterman e Rice (2014, em especial pp. 357–365) discutem como modelos desse tipo distanciam-se de outros tipos de modelo, embora mantenham algum tipo de função representacional.

na qual N é o tamanho de uma população, r é um coeficiente de crescimento, e K é o tamanho populacional máximo suportável pelos recursos disponíveis – espaço, alimento, abrigo. A parte entre parênteses, em específico, representa a porção não utilizada da capacidade de suporte (GOTELLI, 2007, pp. 28-9).[22] A equação, enfim, representa o comportamento de um sistema. Mudanças no modelo matemático correspondem a mudanças no sistema-alvo, e vice-versa.

A equação (7), por exemplo, possui contrapartes no modelo não físico do pêndulo simples. É o caso, também frequentemente, que equações desse tipo sejam difíceis ou mesmo impossíveis de computar e que algumas simplificações sejam feitas. Essas simplificações ocorrem tanto no modelo não-físico quanto em suas contrapartes no modelo matemático. Por exemplo, supor que o ângulo de deslocamento do pêndulo é muito menor que $1rad$ permite que simplifiquemos (7) em

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{\ell}\theta = 0. \tag{9}$$

dado que nos comprometamos com $sin\theta \approx \theta$. A equação resultante é a de um movimento harmônico simples. Outro tipo de simplificação, menos explícito, consiste em restringir o movimento do pêndulo a dois eixos. É essa simplificação que permite que a equação (8) apropriadamente modele o movimento do pêndulo. Se dermos ao sistema um grau de liberdade adicional – por exemplo, ao permitir que o pêndulo movimente-se em três eixos – temos que adaptar o modelo matemático a isso. O resultado é o modelo não físico de um pêndulo esférico e a equação que representa seu movimento é derivada com a ajuda da mecânica de Lagrange, que será omitida aqui.

Em um exemplo mais complexo – mais representativo da prática científica contemporânea, menos representativo de exemplos filosóficos – as equações de Navier-Stokes ilustram um caso no qual aproximações e simplificações não são apenas convenientes, mas necessárias. Tais equações são reconhecidas por corretamente descrever o movimento de fluidos viscosos. São, assim, amplamente aplicáveis: de previsões climáticas a eletrólitos. De qualquer forma, soluções analíticas para essas equações são incrivelmente difíceis de alcançar:

> Tais equações diferenciais parciais não lineares não são possíveis de solucionar exceto em circunstâncias muito simples e bastante superficiais. Como resultado, a prática comum é ver essas equações como [uma versão de uma equação geral] e então 'truncá-las' ao fazer suposições simplificadoras para obter um conjunto de equações [cujos parâmetros são limitados a valores pequenos]. (TAVAKOL, 1991, p. 151)

O resultado é um conjunto de equações simplificadas. Além disso, diferentes suposições simplificadoras rendem equações simplificadas distintas que, em regra, representam sistemas com

[22] Por exemplo, se $K = 100$ e $N = 7$, então a porção não utilizada é $[1 - (7/100)] = 0.93$. Isso, por sua vez, resulta que a população está crescendo linearmente segundo a equação $rN(0.93)$. Se $N > K$, rN é multiplicado por um número negativo, o que representa um crescimento negativo da população. Se $N = 0$, $r = 0$ ou $N = K$, o resultado é 0 e a população apresenta crescimento nulo.

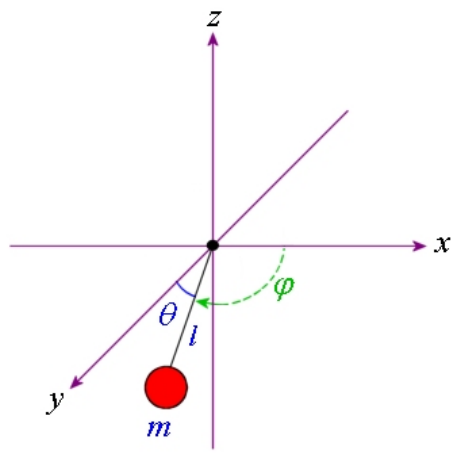

Figura 5 – Diagrama de um pêndulo esférico. O grau de liberdade adicional é representado pela rotação ϕ em torno do eixo z. Um pêndulo simples possui apenas um grau de liberdade: o ângulo θ em relação ao eixo y.

comportamentos diferentes. Tais equações e sua contraparte não-física, então, devem ser testadas. Como, exatamente, modelos matemáticos são testados não será explorado aqui em detalhe, apenas mencionado.

O caso geral é bem descrito por Koperski (KOPERSKI, 1998). No estudo da dinâmica, por exemplo, modelos matemáticos comumente são testados relativamente aos dados de seu sistema-alvo e tornam-se mais precisos à medida que melhor se adéquam aos dados ou que melhor permitem a derivação de predições. Apresento a seguir, uma maneira possível de entender a relação modelo matemático-dados, exposta por Koperski e advogada por Ronald Laymon (LAYMON, 1989) sob o nome de 'improvabilidade gradual' (*piecemeal improvability*).

Segundo a concepção da improvabilidade gradual (IG), quanto melhor as condições iniciais forem definidas, melhor as previsões dadas pelo modelo matemático devem ser. Se esse não é o caso, o modelo é desconfirmado (KOPERSKI, 1998, p. 630). Para sistemas de dinâmica, considere o seguinte esquema. Um modelo matemático – uma equação, ou um conjunto de equações – M e um conjunto de condições iniciais tal que, quando solucionadas, rendem uma série de predições $\mathbf{p}(t) =< p_1, p_2, ..., p_n >$. A série é comparada à série de medições – os dados coletados, disponíveis, do sistema-alvo do modelo – $\mathbf{m}(t) =< m_1, m_2, ..., m_n >$. Mais séries de predições são produzidas ao alterar as condições iniciais/contornantes. A série de predições, de forma $\mathbf{p}^1$, $\mathbf{p}^2$, ..., $\mathbf{p}^n$, continua sendo comparada à $\mathbf{m}(t)$. Por fim, o modelo matemático é dito realístico – ou, simplesmente, um bom modelo matemático – se a sequência de séries $\mathbf{p}^1$, $\mathbf{p}^2$,..., $\mathbf{p}^n$ tende à $\mathbf{m}(t)$. Caso contrário, o modelo é desconfirmado (p. 631). Outros tipos de concepção, por exemplo, podem permitir com que o modelo em si, suas relações internas, também mudem. Note, no entanto, que IF permite apenas que as condições iniciais e contornantes (ou, limitantes) sejam alteradas.

Modelos matemáticos, sejam eles equações individuais ou conjuntos de equações, possuem uma maneira própria de operar e de serem testados pelos dados disponíveis.[23] Ademais, há uma conexão entre seu funcionamento e o funcionamento de modelos não físicos. Modelos matemáticos do pêndulo, à medida que impõem restrições ao seu movimento ou que adicionam parâmetros adicionais, possuem uma contraparte na descrição de modelos não físicos do pêndulo. Um outro tipo de estrutura, frequentemente operando conjuntamente com modelos matemáticos, é a de um espaço de estados.

Sistemas físicos e não físicos evoluem no tempo. Ao arranjo em que tais sistemas se encontram em determinado momento t_1 podemos dar o nome de *estado*. Ao longo do tempo, digamos $< t_1, t_2, ..., t_n >$, sistemas se arranjam em diversos estados. O conjunto de tais estados é o que chamamos de um *espaço de estados*. Cada qual possui um "domínio de objetos mais uma 'função de história' que atribui a cada objeto uma história, isto é, uma trajetória nesse espaço" (FRAASSEN, 1987, p. 109).[24] O exemplo paradigmático é o de um sistema de partículas na mecânica clássica. É dito de um sistema com um número n de partículas que há um espaço de estados constituído por um espaço linear (ou, vetorial) $6 * n$-dimensional, em que cada ponto corresponde a três coordenadas espaciais (x, y, z) e três componentes de seu momento linear (v_x, v_y, v_z).

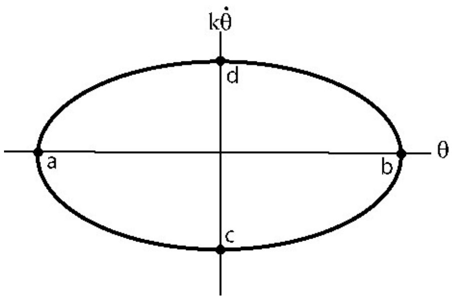

Figura 6 – Espaço de estados para um pêndulo simples I, (KOPERSKI, The Internet Encyclopedia of Philosophy)

Imagine novamente um pêndulo. Em especial, considere a equação (7), o modelo matemático para um pêndulo simples sem fricção. Um espaço de estados dessa equação – e do sistema em si – é ilustrado pela figura 5, em que θ e $k\dot{\theta}$ correspondem ao ângulo de deslocamento e a velocidade, respectivamente.

Em um diagrama um pouco mais informativo (figura 6), o eixo horizontal representa o ângulo de deslocamento θ e o eixo vertical representa o momento conjugado do sistema – grosso modo, sua velocidade, resultado do componente $\frac{d\theta}{dt}$. No diagrama, a linha vermelha representa algo chamado de *separatrix*, que divide o espaço de estados em duas regiões. Dentro da linha, o

[23] O que são 'dados disponíveis' é algo difícil de responder, mas vejam-se os trabalhos de . Fraassen (1987, pp. 112–120) e Leonelli (2019).

[24] Van Fraassen restringe a análise de espaços de estado a teorias não relativísticas (*ibid.*) No que se segue, isso não é de importância.

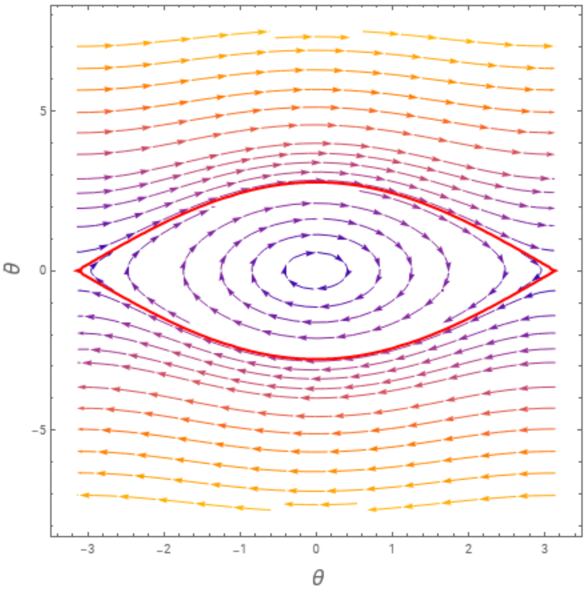

Figura 7 – Espaço de estados para um pêndulo simples II, (HIGGINS, 2013)

pêndulo apresenta um movimento de ‘vai-e-vem’, tal como o pêndulo de um relógio; fora da linha, o pêndulo se movimenta circularmente – em torno de seu suporte.

Modelos matemáticos devem ser entendidos como pares de seus sistema-alvo. Como vimos, as equações e condições impostas pelo modelo possuem contrapartes, ora em modelos físicos, ora em modelos não físicos. Mexer nas criações imaginárias da comunidade científica – os modelos não físicos –, por exemplo, implica mexer em suas contrapartes matemáticas. O inverso também é verdade.

Modelos representacionais sugerem sua função, eles representam. Apresentei três tipos de modelos representacionais, que acredito serem ‘termos genéricos’ que admitem diferenças internas. Modelos físicos tipicamente representam um sistema em maior ou menor escala. O modelo do DNA de Crick e Watson é um exemplo do segundo tipo, o modelo da baía de São Francisco, do primeiro. Cada modelo, possuindo objetivos distintos, opta por representar fielmente uma ou outra propriedade de seu sistema-alvo: sua estrutura, proporção, salinidade, cores, etc. Similarmente, modelos não físicos ocupam o mesmo papel representacional, embora apresentem as propriedades de seu sistema de forma idealizada, distorcida. A razão por trás disso, foi sugerido, é a de que as contrapartes matemáticas – os modelos matemáticos – tratam bem de sistemas idealizados. Há, na dinâmica ‘modelo não físico-modelo matemático’ uma eventual melhoria, ilustrada neste trabalho pela concepção da improvabilidade gradual, em que o resultado são modelos mais fiéis ao que procuram representar.

Modelos não físicos funcionam similarmente a modelos teóricos. A relação entre modelos teóricos e modelos representacionais pode ser melhor iluminada agora. Modelos teóricos relacionam-se com a teoria à qual estão submetidos na medida em que a teoria é verdadeira do modelo. Um modelo representacional, por sua vez, media as hipóteses do modelo teórico com o mundo, ao fornecer uma representação – seja ela física, não-física ou matemática. Modelos representacionais do tipo não-físico são um caso especial, nessa concepção, dado que são construídos a partir das hipóteses de um modelo teórico. A apresentação aqui dada é muito limitada: com certeza há muitos outros modelos, e ainda mais conexões e dependências dentre eles, do que foi aqui discutido. A terminologia de modelos para filósofos da ciência é como uma selva.

Na próxima seção, apresento como as duas principais concepções acerca da estrutura de teorias científicas abordam o uso de modelos na prática científica. Como veremos, modelos foram primeiramente considerados em geral apenas como instrumentos heurísticos – sem utilidade para além de seu valor didático. Mais atenção foi dada a modelos, embora quase exclusivamente a modelos *lógico-matemáticos*. A transição de um discurso de modelos desse tipo, *à la* Tarski, para um discurso sobre os modelos dos quais cientistas discursam foi lenta. Um dos autores que mais chamou a atenção para isso foi Giere. Sua concepção de modelos parece-me mais fiel ao modo como modelos são utilizados na prática científica – ou, ao menos, é o que buscarei mostrar mediante uma análise da sua noção de ‘similaridade’.

3 MODELOS SELVAGENS: SEU PAPEL NA FILOSOFIA DA CIÊNCIA

O mundo é um lugar complexo; uma maneira de contornar sua complexidade é a elaboração de modelos, visando simplificar sistemas-alvo específicos. A seção anterior dedicou-se à apresentação de alguns desses modelos. É, no entanto, frequentemente *em conjunto* com teorias que modelos são utilizados. Filósofos da ciência nem sempre concordaram sobre o quão importante modelos são na prática científica. Como veremos, a transição de uma discussão focada meramente em teoria para uma discussão que englobasse o uso de modelos ocorreu lentamente. Nesta seção, exploro duas concepções acerca da estrutura de teorias científicas e sua conexão com modelos – a concepção sintática e semântica.[1] Apresentar a concepção semântica e a sua introdução de modelos exige esclarecer como teorias relacionam-se a modelos. Indico três alternativas: hierarquia de modelos, isomorfismo e similaridade. Detenho-me em maior detalhe na relação de similaridade e de suas vantagens.

No início do século passado, teorias científicas eram geralmente tidas como conjuntos de enunciados teóricos que se relacionam a enunciados observáveis, sendo interpretados via regras de correspondência (CARNAP, 1995; HEMPEL, 1952; HEMPEL, 1970). O aspecto mais importante de uma teoria segundo essa abordagem é a possibilidade de axiomatização de seus enunciados teóricos, daí seu nome: "abordagem sintática". Alguns problemas logo surgiram. Dentre eles, a exigência de uma linguagem formal de primeira ordem para a axiomatização de teorias, cuja consequência é limitar a análise de teorias à escolha de uma linguagem particular (SUPPE, 2000; FRAASSEN, 1980, p. 56). Uma possível solução para o problema foi largar linguagens de primeira ordem e aderir à matemática. Essa passagem deu início a uma segunda concepção: a "abordagem semântica", segundo a qual uma teoria é um conjunto de modelos abstratos, isto é, um conjunto de estruturas matemáticas que tornam certos axiomas verdadeiros.[2] Esta seção as introduz.

[1] Outra concepção, geralmente citada ao lado das concepções sintática e semântica, é a pragmática. Embora a versão de Giere (ver abaixo) esteja de acordo com alguns dos comprometimentos da concepção pragmática – a saber, alinhar-se à prática e considerar os agentes e propósitos da investigação científica – uma apresentação detalhada é omitida deste trabalho. Outra omissão importante é a de 'estruturas parciais', uma possível extensão à concepção semântica de teorias. Para uma introdução à concepção pragmática e à noção de 'estruturas parciais', ver, respectivamente, Winther (2021, S4) e da Costa & French (1990, pp. 254–265). Ver também Suárez & Cartwright (2008) e Bueno *et al.* (2012) para uma discussão entre proponentes da concepção pragmática e semântica. Outra abordagem pragmática, sob o nome de "modelos como mediadores" encontra-se em Morgan & Morrison (1999).

[2] As origens da abordagem semântica datam, até onde sei, de 1961 (SUPPES, 1961), embora ainda não denominada como tal. Para uma introdução – um tanto extensa – do equipamento formal dessa abordagem, ver Suppes (1957, cap. 12).

3.1 A abordagem sintática: axiomas, regras, axiomas...

Como visto acima, a abordagem sintática denomina-se como tal pelo seu foco na axiomatização dos enunciados de uma teoria. Segundo ela, a estrutura de teorias compreende (FRENCH, 2013, p. 301):

- um formalismo F;
- um conjunto de regras de correspondência C;
- um conjunto de axiomas (enunciados teóricos) T.

O formalismo F constitui-se de uma linguagem L e um cálculo dedutivo definido a partir de L. L contém termos lógicos e não lógicos. Os termos não lógicos desambiguam-se em termos teóricos e termos observáveis. As regras C transpõem termos teóricos e termos observáveis. Os enunciados teóricos e seus termos recebem uma interpretação parcial, admitindo futuras melhorias por C (CARNAP, 1995, p. 236). Como ilustração, consideremos a equação de Clapeyron

$$PV = nRT \tag{10}$$

propriamente axiomatizada: a equação é um axioma T e C constitui-se de enunciados do tipo "**T** é equivalente à temperatura indicada em um termômetro propriamente calibrado fixo ao sistema físico" e "**V** é equivalente ao volume de um frasco de dimensões ***xyz*** que contém o gás avaliado". '**T**' e '**V**' são termos teóricos; 'temperatura' e 'volume', termos observáveis. Uma teoria, por fim, é o conjunto TC de todos seus axiomas e regras de correspondência.[3]

A abordagem sintática logo recebeu críticas. Neste trabalho, foco apenas em um problema: o papel atribuído a modelos.[4] Em geral, modelos envolvem um processo de idealização, cujo produto é a simplificação de um sistema físico. Tome, por exemplo, o modelo do plano inclinado: planos inclinados são idealizados no modelo como planos inclinados sem atrito. Cientistas sabem bem da inexistência de tais planos, mas usam o modelo de qualquer maneira. Além disso, o modelo é um meio para a melhoria da ciência. Como a abordagem sintática acomoda essas observações?

Não muito bem. Enunciados observacionais contêm descrições de estados físicos, observáveis. Por meio de regras de correspondência, selecionam-se axiomas da teoria que se aplicam a descrições adequadas. No exemplo acima, as regras de correspondência selecionam a

---

[3] Hempel revê as noções de regras de correspondência e de termos observáveis e teóricos, substituindo-as respectivamente por 'princípios de ponte' e 'princípios internos'; essa troca é feita de maneira à contornar problemas referentes à distinção observável/teórico, ver Hempel (1970).

[4] Quase todos os aspectos da abordagem sintática foram alvo de objeções: regras de correspondência e sua clareza, a axiomatização e sua dependência linguística, interpretações parciais, a distinção observacional/teórico e o uso de uma metamatemática como ferramenta de axiomatização. Sobre esses problemas, ver Suppe (1977, pp. 62-118).

equação 10 como aplicável à descrição de um recipiente contendo um gás. Essas descrições, no entanto, raramente condizem com os estados físicos do mundo. Esse é um dos pontos centrais de Cartwright e da literatura subsequente:

> (...) o 'tipo certo de descrição' para atribuir uma equação raramente é, ou mesmo nunca é, uma 'descrição verdadeira' do fenômeno estudado; e há poucos princípios formais para ir de 'descrições verdadeiras' para o tipo de descrição que implica uma equação. Há apenas regras gerais, bom senso e, por fim, a exigência de que a equação final deve cumprir seu propósito. (CARTWRIGHT, 1983, p. 133)

Regras de correspondência são tidas como meios entre os axiomas de uma teoria e os enunciados observáveis (ou aqueles enunciados já disponíveis anteriormente, ver referência na nota 3). O problema aqui apresentado é a raridade de tais enunciados – do 'tipo certo de descrição'. Ilustrações do problema são facilmente encontradas em manuais. Pode-se aplicar equações da mecânica sobre a tensão efetuada sobre um fio ou a aceleração sobre objetos a partir das descrições fornecidas por uma máquina de Atwood (NUSSENZVEIG, 2013a, p. 139); equações da termodinâmica sobre a energia interna de um sistema ou o volume de um gás aplicam-se dada a descrição de um gás ideal (NUSSENZVEIG, 2013b, pp. 188–95). Ambas as descrições não são, como Cartwright escreve, 'descrições verdadeiras'. Pode haver sistemas físicos semelhantes às descrições de uma máquina de Atwood ou de um gás ideal ou a de partículas puntiformes, mas não idênticas. Regras de correspondência ainda podem mediar entre axiomas e enunciados observáveis, mas os axiomas aplicam-se somente à modelos do observável.

Vejamos um exemplo de Cartwright (1983, pp. 135–9). À primeira vista, formalizações da mecânica quântica assemelham-se à estrutura que a abordagem sintática propõe. O axioma central é a equação de Schrödinger. Ela nos mostra como um sistema evolui ao longo do tempo dado que conhecemos seu hamiltoniano - uma representação matemática da energia cinética e potencial do sistema. Outros candidatos a axiomas são princípios de conservação de *momentum* e energia. As regras de correspondência permitem o "vai-e-vem" para a linguagem matemática: vetores representam estados, operadores representam quantidades observáveis, etc. Por fim, a escolha de um hamiltoniano apropriado é essencial para usar a teoria, "os princípios que nos mostram como fazer [essa escolha] são [a]s verdadeiras [regras de correspondência] da mecânica quântica" (p. 136). Ora, segundo a abordagem sintática, aqueles interessados deveriam aprender tais regras com os axiomas da teoria de um lado e exemplos e sistemas reais do outro; no entanto, esse não é o caso:

> Manuais de qualidade para graduandos avançados seriam cheios de discussões sobre situações concretas e os hamiltonianos que as descrevem (...) [se a concepção sintática estivesse certa] deveria existir menção de coisas concretas feitas de materiais do mundo real. Isso é notavelmente ausente (...) Em vez disso, aprende-se sobre (...) uma sequência de hamiltonianos modelo. Chamo-os de 'hamiltonianos modelo' porque se encaixam somente a objetos altamente ficcionalizados. (*ibid.*)

Regras de correspondência não mediam diretamente entre os axiomas de uma teoria – isto é, as equações que regem seus sistemas-alvo – e o mundo, descrito por enunciados teóricos. Elas mediam, sim, entre os axiomas e *simplificações* do mundo, seus modelos. O defeito da abordagem sintática acentuado aqui é a desconsideração de tais itens da prática científica.

3.2 A abordagem semântica: extra, extra linguístico

A abordagem semântica parte da ideia de modelos. A estrutura de teorias é descrita a partir de uma família de modelos lógico-matemáticos. Em contraste com a abordagem sintática, a teoria é identificada com o conjunto de modelos que realizam seus – no vocábulo sintaticista – axiomas. Além de fugir dos problemas de dependência linguística – ao mover o papel da interpretação de regras de correspondência para modelos –, argumenta-se que essa abordagem se assemelha à prática científica do uso de modelos (SUPPES, 1962).

A noção de modelo aqui empregada é aquela de Tarski: "Uma possível realização na qual todos os enunciados válidos de uma teoria T são satisfeitos é um *modelo* de T" (TARSKI, 1953, p. 11). A abordagem semântica compromete-se com a ideia de que modelos – no sentido tarskiano – são o ponto de partida para modelos científicos. Modelos de determinadas equações são produzidas primeiro em termos lógico-matemáticos; após isso, a sua interpretação física, se possível, é efetuada.[5] Vejamos dois exemplos abaixo – pertinentes à geometria e à física, respectivamente.

Suponha os seguintes axiomas de uma teoria T:

A1 - para quaisquer duas linhas, há ao menos um ponto situado em ambas;

A2 - para quaisquer dois pontos, há exatamente uma linha situada em ambos;

A3 - para toda linha L, existem ao menos dois pontos situados em L;

A4 - há um número finito de pontos.

Há um modelo M de T, se M realiza os axiomas de T. A figura abaixo é um modelo de T. A4 é satisfeito pois há apenas 7 pontos (A-G); facilmente vê-se que A1-A3 são também satisfeitos (FRAASSEN, 1980, p. 41–43).

Suponha, agora, a mecânica clássica de partículas propriamente axiomatizada MC. MC pode ser realizada pela quíntupla $\mathcal{P} < P, T, s, m, f >$ onde P é o conjunto de partículas, T é o período decorrido, s é uma função de posição do produto cartesiano $P \times T$, m é uma função de massa de P e f é uma função de força do produto cartesiano de P. Tal realização é dita um modelo de MC. O modelo lógico-matemático $\mathcal{P}$ relaciona-se a um modelo no sentido

[5] Note, há dois sentidos de modelo aqui. *Primeiro*, o modelo no sentido tarskiano é configurado; *após*, sua interpretação física é feita, se possível. A primeira espécie de modelo é puramente lógico-matemática, enquanto à segunda soma-se a interpretação física: tornando-a propriamente uma espécie de modelo científico.

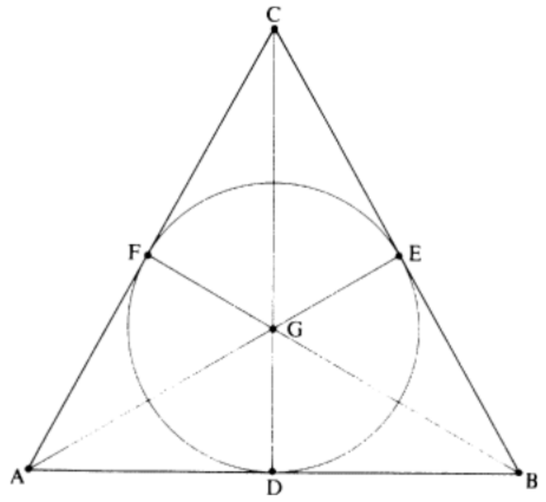

Figura 8 – Plano de Fano (FRAASSEN, 1980, p. 42)

científico mapeando seus parâmetros a objetos físicos (ver nota 5). Uma possível interpretação física é o mapeamento de *P* a corpos planetários (SUPPES, 1961, p. 167).

Apresentar uma teoria, segunda essa abordagem, é definir um conjunto de modelos diretamente. Tais modelos, por sua vez, devem satisfazer os "axiomas" (como denominados na abordagem sintática) da teoria.[6] É de grande importância que a interpretação de uma teoria seja feita em termos lógico-matemáticos: daí a superação de uma dependência linguística e seu estatuto extra linguístico. Ademais, modelos tais como $\mathcal{P}$, embora não linguísticos, ocupam um papel parecido a de suas antecessoras regras de correspondência: eles mediam os axiomas, equações de uma teoria e o mundo. Ao introduzir a noção de modelos como central à estrutura de teorias, parece que nos aproximamos da prática científica. Qual a relação, em maior detalhe, entre modelos e o mundo, segundo a abordagem semântica?

Há ao menos três respostas possíveis. A "hierarquia de modelos" de Suppes (1962), o "isomorfismo" de van Fraassen (1980) e a "similaridade" de Giere (2004). De acordo com a resposta da hierarquia de modelos, modelos distintos compõem a estrutura geral de teorias científicas. (i) "Modelos de teoria" satisfazem os axiomas da teoria; (ii) "modelos de experimento" satisfazem padrões na configuração da experimentação e análise de um experimento particular; e (iii) "modelos de dados", por fim, satisfazem os resultados obtidos que possuem um parâmetro análogo no modelo de teoria (SUPPES, 1962, pp. 25–33), além de transformar os "dados crus" – excluindo possíveis erros e aplicando reduções (por exemplo, ajustes de curva).[7] Os três modelos relacionam-se ao mundo, embora os modelos de dados se sobressaiam na medida em que lidam

[6] Note a diferença de ênfase. Na abordagem sintática, teorias eram definidas a partir de axiomas definidos em uma linguagem L e regras de correspondência. Aqui não. Axiomas apenas selecionam uma ou outra família de modelos e vêm a se tornar verdadeiros *em razão* de que tais modelos os satisfazem. Na primeira, a estrutura gira em torno de axiomas; na segunda, de modelos.

[7] Sobre o processo de coleta e interpretação de dados, aqui descrito como "modelos de dados", ver (BREWER; CHINN, 1994).

diretamente com o sistema-alvo da teoria – enquanto os modelos de experimento, por exemplo, relacionam-se com o aparato experimental e suas configurações.

Similarmente, van Fraassen (1980, pp. 41–70) escreve sobre a relação entre "subestruturas empíricas" e "aparências" (p. 45). "Aparências" são fenômenos observáveis, tais como os resultados registrados em laboratório; "subestruturas empíricas" são estruturas de um modelo parente que buscam representar tais aparências. Quando as subestruturas de um modelo *M* são isomórficas – isto é, possuem um mapeamento um-a-um bijetivo – as aparências e as subestruturas são isomórficas aos seus modelos parentes, uma teoria científica é dita empiricamente adequada. A relação entre modelo e mundo, assim, é o isomorfismo.[8]

Por fim, a resposta de Giere à questão acima (1988, 2004, 2010) introduz algo de novo. Segundo Giere, modelos relacionam-se ao mundo ao serem *usados* para representar certos aspectos de seu sistema-alvo. Aqueles que os usam – cientistas! – exploram similaridades que o modelo possui com o mundo. A aparente novidade é o aspecto intencional da representação: "não é o modelo que faz a representação; é o cientista utilizando o modelo que a faz" (GIERE, 2004, p. 749). É a escolha, por parte do cientista, de aspectos similares entre o mundo e o modelo que permitem a representação. Um grau objetivo de similaridade, note-se, é dispensável: não é necessário se comprometer com graus de similaridade objetivos entre sistemas, pois a escolha de uma relação de similaridade depende dos interesses do cientista com um experimento ou pesquisa particular. Em outras palavras, depende do que ele quer salientar no fenômeno estudado. Um mesmo fenômeno pode sempre ser representado por modelos diferentes, conforme aspectos diferentes são salientados por modelos diferentes. Abaixo, finalizo essa seção explorando em maior detalhe a versão de Giere, na medida em que elabora a abordagem semântica em geral e a ideia de modelo. Além de apresentar a relação de similaridade proposta, mostro como a versão de Giere estrutura teorias.[9]

Já foi dito que a relação entre modelos e o mundo, de acordo com Giere, deve ser entendida em termos de similaridade. Relações de similaridade não carregam uma boa reputação em filosofia, mas algum sentido dela ainda pode ser retirado.[10] A relação com a qual Giere se compromete é a seguinte:

$$S \text{ usa } X \text{ para representar } W \text{ para propósitos } P$$

na qual S é um agente – uma cientista, uma comunidade científica –, X é um modelo, W

---

[8] Ver também Fraassen (2008).

[9] É interessante notar que Giere utiliza também da 'hiearquia de modelos' proposto por Suppes, embora de sua própria maneira (Giere, 2010). Suppes, no entanto, elabora sua hiearquia de modelos utilizando as noções de isomorfismo e homomorfismo (Suppes, 2002, pp. 54–62), enquanto Giere a elabora utilizando a noção de similaridade.

[10] "Similaridade, sempre pronta para resolver problemas filosóficos e superar obstáculos, é uma fingidora, uma impostora, uma charlatona" (GOODMAN, 1972, p. 437). Goodman apresenta sete argumentos contra a noção de similaridade e sua aparente utilidade. Em poucas palavras, dois objetos quaisquer compartilham de ao menos uma propriedade: qualquer objeto é similar a qualquer outro. Similaridade, assim, é uma relação universal e filosoficamente desinteressante. Para uma continuidade ao trama, ver DECOCK & DOUVEN (2011).

delimita certos aspectos do mundo e P é o propósito da representação (GIERE, 2004, p. 743). Por enquanto, considere P como a investigação científica de W. A relação de similaridade, note-se, ocorre não apenas entre o modelo e a teoria: É o agente S que julga X e W como similares dado P. A relação de similaridade, assim, pode ser descrita como

X é similar a W em certos aspectos e graus; que são determinados por S e P.

Em um exemplo simples, quando Watson e Crick anunciam o modelo do DNA, julgaram seu modelo como similar à estrutura do DNA dados seus propósitos de investigação. No caso, são similares no que diz respeito à estrutura, embora não o sejam em material, tamanho, ou nos exatos ângulos de ligação. O modelo em questão é às vezes chamado de “modelo de escala”, uma réplica física do sistema que representa (ver Fig. 9). Mas, e outros modelos? Em específico, como a noção de similaridade se encaixa aos modelos matemáticos que exploramos até aqui? A seguir, seguindo um exemplo de Giere (1988, pp. 64–91), apresento a resposta de Giere, juntamente de detalhes acerca de sua posição sobre estrutura de teorias.

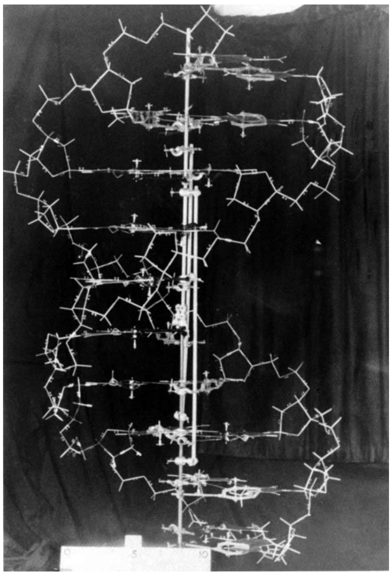

Figura 9 – Modelo do DNA de Watson e Crick

Sistemas idealizados, tais como aqueles descritos em manuais científicos, são ditos modelos. Giere discute alguns exemplos de modelos em mecânica – considerando seu estatuto central no aprendizado científico. Um manual sobre mecânica comumente começa de seus “princípios”, as três leis de Newton. Considere, para esse exemplo, somente a segunda:[11]

$$F = ma = m(\frac{d^2x}{dt^2}) \tag{11}$$

[11] Ou, após a introdução do momento linear, **p**: $F = ma = m(\frac{d\mathbf{p}}{dt})$.

Se tomarmos (11) como um axioma da teoria, pouco se segue. Em vez disso, manuais prosseguem introduzindo diferentes casos de aplicação nos quais F assume uma forma distinta. Giere menciona o caso de um oscilador harmônico (GIERE, 1988, p. 68). Sistemas que, quando deslocados de um estado de equilíbrio, sofrem uma força restauradora proporcional ao deslocamento, são chamados "osciladores harmônicos". Nesse caso, a equação (11) é expressa por:

$$F = ma = -kx \tag{12}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x \tag{13}$$

,onde k é uma constante e x é o deslocamento da partícula de massa m de seu estado de equilíbrio. Em sua forma diferencial (12), possui a seguinte solução:

$$x(t) = Acos(\omega t) + Bsin(\omega t), \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{14}$$

A e B determinam condições iniciais. A constante A é a posição inicial da partícula em $t = 0$ e B é a sua velocidade inicial dividida pela frequência angular. "Com aplicações particulares em mente, autores [de manuais] possuem alguma motivação para considerar condições iniciais específicas" (Giere, p. 69). Ademais, autores de manuais comumente explicitam que a aplicação da equação (13) a um sistema tal como o da imagem abaixo requer "premissas simplificadoras" (*ibid.*), tais como (1) a mola não está sujeita à qualquer força de fricção, (2) a mola não possui massa, e etc. (ver citação em Giere, p. 69). Simplificações desse tipo, prossegue Giere, são interessantes à medida que em que deixam claro o escopo de aplicação das equações acima. São modelos do mundo, no qual tais simplificações são aplicadas. Não há molas sem massa; nem partículas sem forças de fricção interna.

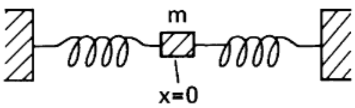

Figura 10 – Ilustração do movimento de um oscilador harmônico.

Outros dois casos de aplicação – de um pêndulo simples e de um pêndulo amortecido – são apresentados por Giere. Seu ponto é que cada caso introduz ainda mais condições iniciais e simplificações no sistema. Então, a que se aplicam as equações acima expostas? Deve já estar claro que a resposta é: modelos! O oscilador harmônico acima exposto é um modelo da equação $F = -kx$, assim como as versões (aqui não expostas) do pêndulo simples e amortecido. Pode-se afirmar que as equações acima são verdadeiras de seu modelo, ou "modelo teórico" (p. 80).

Até aqui, tudo bem. Suppes e van Fraassen, similarmente, afirmam que a teoria é verdadeira de seus "modelos de teoria" ou "modelos parentes". Resta explicar como tais modelos abstratos são ligados ao mundo. Giere rejeita a relação de isomorfismo como forte demais:

> (...) em nenhum dos exemplos citados em textos padrão de mecânica, por exemplo, existe qualquer reivindicação de isomorfismo. De fato, os textos muitas vezes explicitamente notam aspectos em que o modelo falha em ser isomórfico ao sistema real. (GIERE, 1988, p. 80)

Sua sugestão é a de que modelos completamente interpretados e especificados estão em relação de similaridade com um sistema físico. A interpretação de um modelo ocorre quando termos do modelo recebem uma interpretação, tal como "massa" e "posição". A especificação, por outro lado, é feita ao identificar elementos interpretados a elementos do sistema-alvo. Assim, em $F = -kx$, interpreta-se x como o deslocamento de uma partícula de seu estado de equilíbrio e identifica-se x, digamos, a um objeto particular preso a uma mola qualquer (pp. 74–76). A relação de similaridade, por fim, tem a seguinte forma: "tal e tal sistema real identificável é similar a um modelo designado nos aspectos e graus indicados" (p. 81). Por exemplo, "a Terra e a Lua formam, em um grau alto de aproximação, um sistema gravitacional newtoniano de duas partículas" (*ibid.*). No que se segue, elaboro uma noção defensável de similaridade. Comecemos com o seguinte esquema da noção de similaridade (FRIGG; NGUYEN, 2020):

S1. Um modelo científico M representa um sistema-alvo S se e somente se M e S são similares.

Como já vimos, isso não se sustenta: coisas são similares sob vários aspectos. Sustentar *S1* é virtualmente sustentar que tudo é uma representação de todo o resto. Contornar o problema, no entanto, não é impossível:

S2. Um modelo científico M representa um sistema-alvo S sse M e S são similares sob certos aspectos e em graus relevantes.

O primeiro problema, que também se encontra em *S1*, é o de que a relação é simétrica.[12] Representações, por sua vez, são geralmente assimétricas. Costuma-se dizer que um modelo científico M, por exemplo, representa um sistema S; mas não que S representa M. Mas deixemos isso de lado por enquanto. Outra objeção a *S2* é a de que ela confunde casos de não representação e de má representação. Má representação (*misrepresentation*) pode se expressar de duas maneiras (SUÁREZ, 2003, p. 233). A primeira, e menos problemática, é a má representação por imprecisão. *S2* admite casos de imprecisão, de fato, parece ser um de seus méritos – pois é necessário apenas que um modelo seja similar sob certos aspectos, o que dá espaço para que aspectos imprecisos

[12] Ou é? Um conjunto de estudos empíricos sobre atribuições de similaridade (MEDIN; GOLDSTONE; GENTNER, 1993) apresentaram indícios de que comparações de similaridade são direcionais (p. 272), além de possuírem outras características filosoficamente interessantes, como contextualidade (*ibid.*).

do modelo sejam deixados de lado. As imprecisões de um modelo incompleto ou idealizado não são problemáticos, na medida em que haja similaridades relevantes. Um segundo tipo de má representação, no entanto, torna *S2* insatisfatório. Quando equivocadamente supomos que o alvo de uma representação é X, quando na verdade não o é, estamos diante de um caso de *mistargeting* (*ibid.*) Supor que a obra *Mãos a Rezar* de Dürer representa as mãos de meu avô é obviamente um caso de *mistargeting*, embora *S2* não possua nenhum recurso para afirmar tal coisa. O esquema seguinte (o esquema preferido de Giere) contorna o problema da má representação:

S3. Um modelo científico M representa um sistema-alvo S sse existe um agente A que usa M para representar S ao propor uma hipótese teórica H que especifica a similaridade (sob certos aspectos e em graus relevantes) entre M e S para o propósito P (FRIGG; NGUYEN, 2020, S3.1).

A grande novidade é a inclusão de **H**. Uma hipótese teórica, segundo Giere, é um enunciado que declara algum tipo de relação entre *M* e *S* (GIERE, 1988, pp. 80-81). Na defesa de Giere, a relação é a de similaridade.[13] *S3* escapa do problema da má representação justamente pela inclusão de **H**: se **H** é verdadeira, então não há má representação; caso contrário, há. Ao introduzir um elemento intencional, *A*, elimina-se também a simetria: M é usado para representar S e o contrário não é verdade. Mas novos problemas surgem. Para ver isso, considere o esquema proposto por Toon:

H_1. "O carro B é similar ao carro A no tamanho de seu motor, milhagem de combustível, velocidade máxima e assim por diante" (TOON, 2012, p. 252).

Se considerarmos H_1 como uma hipótese teórica anunciada por um agente qualquer, temos que o carro A é um modelo – uma representação – do carro B. Esse, no entanto, não é um caso considerado representacional: o carro A e B estão somente em uma relação de comparação, nada mais que isso. Uma possível resposta é a de que *poderíamos* usar um dos carros para representar o outro. Mas o problema não é esse: sim, há a possibilidade de usarmos um dos itens da comparação como a representação do outro. O problema é que *S3* não admite a possibilidade de mera comparação resultado da apreciação de suas similaridades. Adicionar à *S3* a condição de que M deve denotar S parece resolver o problema. O resultado é esquematizado por Toon nas seguintes linhas:

S4. "Um modelo M representa um sistema S se um agente A usa M para denotar S e explorar similaridades entre M e S ao formar hipóteses teóricas especificando essas similaridade para um propósito P (TOON, 2012, p. 253)."

O ato de denotar é feito em dois níveis. Primeiro, na estipulação de similaridades em **H**. Segundo, no simples ato de fala de uma cientista falando "que isso represente aquilo" (*ibid.*). Agora, ainda

[13] A citação acima ("a Terra e a Lua formam, em um grau alto...") é uma instância de hipótese teórica.

pode ser dito que *S4* não fornece condições suficientes para uma relação de representação. Toon expressa isso no seguinte exemplo.

Queremos ilustrar o número de átomos em uma reação química (TOON, 2012, p. 253). À nossa frente está um brinquedo de criança: um kit de construção. Pegamos as peças e estipulamos que uma denota metano, uma denota hidrogênio, outra denota cloro e assim por diante. Por enquanto, "temos um caso de denotação, não de [representação]; estamos usando [as peças] meramente como objetos convenientes para denotar os vários átomos e moléculas" (*ibid.*). Em algum momento, alguém indica que a peça que usamos para denotar a molécula de metano é tetraédrica – assim como a estrutura molecular do metano. Após isso, notamos a possibilidade de, não apenas usar a peça para denotar o metano, mas para representá-lo como tetraédrico. O importante, comenta Toon, é que "meramente indicar (...) a similaridade entre [a peça] e a molécula não faz nada por si para mudar a maneira com que a peça é usada para representar":

> Podemos perfeitamente indicar, e até mesmo escrever, a similaridade entre os dois e ainda assim continuar usando [a peça] como antes, meramente como um objeto conveniente para substituir (*stand for*) a molécula. Claramente, o que deve mudar é a nossa *interpretação* [da peça]. (TOON, 2012, p. 253)

O problema, talvez não muito óbvio, é o de que a mudança de interpretação – aquela responsável pela representação – não é mencionada em *S4*: ela é adicional. Como Toon coloca, fazer vista grossa para esse problema pode ser uma propensão da maneira como pensamos – usar coisas do mundo como um modelo para outra coisa parece-nos natural. Embora tenha sido dito que há uma *decisão* de mudar de interpretação, parece inevitável que tomemos a peça como um modelo da molécula de metano (em especial, de sua estrutura) após sermos informados de sua semelhança. Adicionalmente, sabemos o que isso significa quase que intuitivamente: a peça é representacional, representa o formato da molécula, embora suas outras propriedades sejam não representacionais (TOON, 2012, p. 254). Embora intuitivo, no entanto, Toon sustenta que uma boa teoria da representação científica deve "explicar exatamente como esse e outros casos de representação, muito mais complicados, funcionam". A conclusão é a de que *S4* parece fornecer condições necessárias para a representação científica, embora não suficientes.[14,15]

Sob o seguinte aspecto há também algo valioso em relações de similaridade. Abordar a relação entre modelos e seus alvos ilumina uma discussão paralela – e muito próxima – acerca

[14] Uma objeção adicional à noção de similaridade – aqui omitida – é a de que tal relação não se sustenta entre objetos concretos e abstratos. Embora alguns sistemas físicos/concretos, sejam representados por modelos físicos, outro não são. Algumas das propriedades instanciadas por objetos concretos não são instanciáveis em objetos abstratos. Para uma apresentação da objeção, ver Thomson-Jones (2009, pp. 290-8). Para uma resposta, ver Teller (2001, pp. 399-402). Para uma noção similar, que busca contornar o problema de propriedades não-instanciáveis, ver Ducheyne (2011).

[15] A noção de similaridade, ainda assim, é frequentemente usada na prática científica. Bengoetxea *et al.* (2014) argumentam, por exemplo, que relações de similaridade são apropriadas para análises filosóficas que buscam contemplar tanto a prática quanto a teoria científica. Em específico, defendem que juízos de similaridade – na forma de hipótese teóricas – são essenciais em dois exemplos: a análise de moléculas orgânicas e a avaliação de substâncias tóxicas.

do primo distante da verdade: a verdade aproximada (*approximate truth*). A noção de verdade aproximada (VA, de agora em diante) surge do debate realista.

Em linhas gerais, realistas científicos sustentam que nossas melhor teorias científicas são aproximadamente verdadeiras (PSILLOS, 1999, p. xix). Sustenta-se isso, em oposição à 'teorias científicas são verdadeiras', pois se sabe que tais teorias são falsas em alguns sentidos e possivelmente falsas em outros (devido à abstrações, idealizações ou mesmo erros mais grosseiros). Uma explicação clara do que significa VA é algo que realistas buscam fornecer. Mas isso mostrou-se difícil, e proponentes contemporâneos do realismo ocupam boa parte de sua escrita esclarecendo suas noções de VA.[16]

Teller (2001, p. 403) propõe a seguinte questão: "de todos os enunciados falsos, qual desses descrevem situações que são 'perto o suficiente' da situação descrita por um enunciado verdadeiro para garantir o título de 'aproximadamente verdadeiro'?". Em outras palavras, sugere Teller, "que situações não reais descritas contam como relevantemente similar à situação real?". A vantagem, sugiro, de abordar o problema de VA em termos de similaridade, é conseguir vê-lo em termos de interesses da comunidade científica – os agentes intencionais– e de seus propósitos e contextos. Uma explicação de VA não deve visar a independência-contextual, mas persegui-la. A noção de similaridade a leva nesse sentido.[17]

Esta seção buscou explorar o caminho trilhado pela literatura acerca da estrutura de teorias. A busca por uma abordagem que inclui aspectos da prática científica – em especial o uso de modelos – acentuou-se ao longo do tempo. A abordagem sintática mostrou-se fraca na explicação de modelos.[18] A abordagem semântica buscou remediar isso: teorias definidas por uma família de modelos. Semelhantemente ao problema com as regras de correspondências sintáticas, versões da abordagem semântica tiveram de elaborar sobre a relação que modelos científicos possuem com os sistemas que buscam representar.

Maior importância foi dada à concepção de Giere: o mundo e os modelos que o representam relacionam-se por similaridade, julgada pelos agentes que fazem a representação. Uma pequena defesa da noção de similaridade foi feita. Concluiu-se que, embora não sirva como uma teoria completa da representação científica, possui seu papel na prática científica e inspira desenvolvimentos em questões paralelas – em especial, no desenvolvimento da noção de verdade aproximada.

Todas as versões semânticas, no entanto, mantêm teorias e modelos em uma relação próxima. Em Suppes (1961, 1962), modelos são elaborados a partir de princípios fornecidos por teorias; em van Fraassen (1980), modelos definem os axiomas da teoria e, em Giere (1988, 2004,

16 Ver Psillos (1999, cap. 11) e Chakravartty (2017). Para uma concepção 'jovem' de VA, ver Weston (1992).

17 Psillos comenta brevemente a posição de Giere sobre a verdade aproximada (PSILLOS, pp. 273-5). Outro caminho que a adoção de uma noção de similaridade – ou, ao menos, uma noção igualmente pragmática – sugere é a do perspectivismo científico (TELLER, 2011).

18 Isso não é dizer que a abordagem tenha sido completamente abandonada. Para uma defesa, ver Lutz (2014); para uma análise de possíveis problemas com a abordagem semântica, por outro lado, ver Halvorson (2012).

2010), quase – senão todos – os modelos caem sob a categoria de “modelos teóricos”. Embora a centralidade de modelos na abordagem semântica seja louvável, analisar modelos somente em relação a teorias pode ter desvantagens.[19] Isso, no entanto, ficará para algum trabalho posterior.

[19] Sobre as diversas discussões suscitadas pela abordagem semântica, ver Suppe (2000).

4 CONCLUSÃO

O principal foco deste trabalho foi a apresentação de uma taxonomia parcial de modelos científicos. Defendi que há uma diferença entre o que chamei de um 'modelo teórico' e um 'modelo representacional'. Modelos teóricos são um tipo de estrutura da qual uma teoria é verdadeira. Eles caracterizam-se por atribuírem uma estrutura interna a um sistema-alvo por meio de hipóteses. Além disso, as eventuais aproximações do sistema-alvo eram tidas como úteis a certos propósitos, conforme definidos pelos usuários do modelo. Modelos representacionais, por sua vez, têm como característica a função representacional. Modelos físicos geralmente representam um sistema aumentando-o ou diminuindo-o, mantendo fielmente as propriedades relevantes à representação pretendida. Modelos não físicos funcionam similarmente, embora sejam objetos abstratos, criações da imaginação científica. Como suas contrapartes, modelos matemáticos representam um sistema – no mais das vezes, sua evolução ao longo de certo período – via equações e espaços de estado.

A segunda seção mostrou como a palavra 'modelo' foi gradualmente implementada em discussões sobre a estrutura de teorias. Na abordagem sintática, atribui-se a eles um papel meramente heurístico. Sob a concepção semântica, modelos foram inicialmente mencionados em sua noção lógico-matemática. Por fim, 'modelo' começou a possuir um significado melhor ilustrado pela noção de um modelo teórico. Falar mais de modelos teóricos implicaria falar mais sobre a conexão que um modelo possui com o mundo. Neste trabalho, comentamos sobre as noções de uma hierarquia de modelos, isomorfismo e similaridade.

Em particular, defendi que uma noção de similaridade, embora possa ser defendida diante de várias objeções – sobre sua simetria, inadmissão de má representações, etc. – não é (em sua versão atual) defensável como uma teoria completa da representação científica. Mesmo assim, a noção de similaridade possui tanto aplicações em casos reais da prática científica quanto em problemas paralelos do realismo científico.

REFERÊNCIAS

ACHINSTEIN, P. Theoretical models. **The British Journal for the Philosophy of Science**, v. 16, n. 62, p. 102–120, 1965.

BATTERMAN, R. W.; RICE, C. C. Minimal model explanations. **Philosophy of Science**, v. 81, n. 3, p. 349–376, 2014.

BLACK, M. **Models and metaphors**: studies in language and philosophy. Ithaca: Cornell University Press, 1962.

BREWER, W.; CHINN, C. The theory-ladenness of data: an experimental demonstration. In: RAM, A.; EISELT, K. (Ed.). **Proceedings of the sixteenth annual conference of the cognitive science society**. Atlanta: Erlbaum, 1994. p. 61–65.

BROOKS, R. L. et al. The dissection of rectangles into squares. **Duke Mathematical Journal**, v. 7, n. 1, p. 312–340, 1940.

BUENO, O.; FRENCH, S.; LADYMAN, J. Models and structures: phenomenological and partial. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 43, n. 1, p. 43–46, 2012.

CARNAP, R. **An introduction to the philosophy of science**. 2. ed. New York: Dover, 1995.

CARTWRIGHT, N. **How the laws of physics lie**. New York: Oxford University Press, 1983.

CHAKRAVARTTY, A. Scientific realism. In: ZALTA, E. N. (Ed.). **The Stanford encyclopedia of philosophy**. Summer 2017. [S.l.]: Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017.

CONTESSA, G. Scientific models and fictional objects. **Synthese**, v. 172, n. 2, p. 215–229, 2009.

CONTESSA, G. Scientific models and representation. In: FRENCH, S.; SAATSI, J. (Ed.). **The Bloomsbury companion to the philosophy of science**. London: Bloomsbury Academic, 2014. p. 120–137.

COSTA, N. C. A. D.; FRENCH, S. The model-theoretic approach in the philosophy of science. **Philosophy of Science**, [The University of Chicago Press, Philosophy of Science Association], v. 57, n. 2, p. 248–265, 1990.

DECOCK, L.; DOUVEN, I. Similarity after goodman. **Review of Philosophy and Psychology**, v. 2, p. 61–75, 2011.

DIBIASE, D. **The nature of geographic information**: an open geospatial textbook. 2020. Disponível em: <https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/>.

DUCHEYNE, S. Towards an ontology of scientific models. **Metaphysica**, v. 9, n. 1, p. 119–127, 2008.

DUCHEYNE, S. Scientific representations as limiting cases. **Erkenntnis**, v. 76, n. 1, p. 73–89, 2011.

ENGINEERS, U. A. C. of. **The technical side of the Bay model**. 1956–? <https://www.spn.usace.army.mil/Missions/Recreation/Bay-Model-Visitor-Center/The-Bay-Model-Journey/Technical-Side/>. Acesso em: 27/05/2021.

FITZGERALD, G. F. **Scientific writings**. Dublin: Franklin Classics, 1902.

FLINT, S. et al. **Principles of Virology**: Molecular biology, pathogenesis, and control. Washington: American Society for Microbiology Press, 2000.

FRAASSEN, B. van. **The scientific image**. Oxford: Clarendon Press, 1980.

FRAASSEN, B. van. The semantic approach to scientific theories. In: NERSESSIAN, N. (Ed.). **The process of science**. Martinus Nijhoff: Dordrecht, 1987. p. 105–124.

FRAASSEN, B. van. **Scientific representation**: paradoxes of perspective. New York: Oxford University Press, 2008.

FRENCH, S. The structure of theories. In: PSILLOS, S.; CURD, M. (Ed.). **The Routledge companion of philosophy of science**. London: Routledge, 2013. cap. 28, p. 301–312.

FRIGG, R.; HARTMANN, S. Models in science. In: ZALTA, E. N. (Ed.). **The Stanford encyclopedia of philosophy**. Spring 2020. [S.l.]: Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2020.

FRIGG, R.; NGUYEN, J. Scientific representation. In: ZALTA, E. N. (Ed.). **The Stanford encyclopedia of philosophy**. Spring 2020. [S.l.]: Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2020.

GALILEU, G. **Dialogues concerning two new sciences**. New York: The Macmillian Company, 1914. Tradução do italiano e latim ao inglês: **Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze**, 1638, trad. CREW, H.; DE SALVIO, A.

GIERE, R. **Explaining science**: a cognitive approach. Chicago: University of Chicago Press, 1988.

GIERE, R. D. How models are used to represent reality. **Philosophy of Science**, v. 71, p. 742–752, 2004.

GIERE, R. D. Why scientific models should not be regarded as works of fiction. In: SUÁREZ, M. (Ed.). **Fictions in science**: philosophical essays on modelling and idealization. New York: Routledge, 2008. p. 248–258.

GIERE, R. D. An agent-based conception of models and scientific representation. **Synthese**, v. 172, n. 269, p. 269–281, 2010.

GOODMAN, N. Seven strictures on similarity. In: **Problems and projects**. New York: The Bobbs-Merrill Company, Inc., 1972. p. 437–448.

GOTELLI, N. **Ecologia**. Londrina: Planta, 2007.

HALVORSON, H. What scientific theories could not be. **Philosophy of Science**, v. 79, n. 2, p. 183–206, 2012.

HEMPEL, C. **Fundamentals of concept formation in empirical science**. Chicago: University of Chigago Press, 1952.

HEMPEL, C. On the “standard conception” of scientific theories. **Analyses of Theories and Methods of Physics and Psychology**, v. 4, p. 142–163, 1970. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11299/184647>.

HESSE, M. **Models and analogies in science**. London: Sheed and Ward, 1970.

HIGGINS, B. G. **Phase space of a simple pendulum**. 2013. Wolfram Demonstration Project: <http://demonstrations.wolfram.com/PhaseSpaceOfASimplePendulum/>. Acesso em 30/05/2021.

KOPERSKI, J. Models, confirmation, and chaos. **Philosophy of Science**, v. 65, n. 4, p. 624–648, 1998.

KOPERSKI, J. **Models**. The Internet Encyclopedia of Philosophy. <https://iep.utm.edu/models/>. Acesso em 30/05/2021.

LAYMON, R. Cartwright and the lying laws of physics. **The Journal of Philosophy**, v. 86, n. 7, p. 353–372, 1989.

LEONELLI, S. What distinguishes data from models? **European Journal for Philosophy of Science**, v. 9, n. 22, 2019.

LUTZ, S. What’s right with a syntactic approach to theories and models? **Erkenntnis**, v. 79, n. 8 (supplement), p. 1475–1492, 2014.

MASSIMI, M. Two kinds of exploratoy models. **Philosophy of Science**, v. 86, n. 5, p. 869–881, 2019.

MAXWELL, J. C. **The scientific papers of James Clerk Maxwell, I**. London: Cambridge University Press, 1890.

MEDIN, D.; GOLDSTONE, R.; GENTNER, D. Respects for similarity. **Psychological Review**, v. 100, n. 2, p. 254–278, 1993.

MORGAN, M. S.; MORRISON, M. (Ed.). **Models as mediators**: perspectives on natural and social science. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

NUSSENZVEIG, M. **Curso de física básica, vol. 1**: mecânica. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

NUSSENZVEIG, M. **Curso de física básica, vol. 2**: fluidos, oscilações e ondas, calor. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

PLATÃO. **Sofista**. 5. ed. São Paulo: Nova Cultural (Os pensadores), 1991. Trad. de Souza. J.; Paleikat, J.; Costa, J.

PRAY, L. A. Discovery of DNA structure and function: Watson and Crick. **Nature Education**, v. 1, n. 1, p. 100, 2008.

PSILLOS, S. **Scientific realism**: how science tracks truth. London: Routledge, 1999.

REDHEAD, M. Models in physics. **The British Journal for the Philosophy of Science**, v. 31, n. 2, p. 145–163, 1980.

STERRETT, S. G. Scale modeling. In: MICHELFELDER, D. P.; DOORN, N. (Ed.). **The Routledge handbook of the philosophy of engineering**. New York: Routledge, 2020.

SUÁREZ, M. Scientific representation: against similarity and isomorphism. **International Studies in the Philosophy of Science**, v. 17, n. 3, p. 225–244, 2003.

SUÁREZ, M.; CARTWRIGHT, N. Theories: tools versus models. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 39, n. 1, p. 62–81, 2008.

SUPPE, F. **The structure of scientific theories**. Chicago: University of Illinois Press, 1977.

SUPPE, F. Understanding scientific theories: an assessment of developments. In: **PSA: Proceedings of the biennial meeting of the philosophy of science assossiation 1998**. Chicago: The University of Chicago Press, 2000. v. 2, p. S102–S115.

SUPPES, P. **Introduction to logic**. New York: Van Nostrand Co., 1957.

SUPPES, P. A comparison of the meaning and uses of models in mathematics and the empirical sciences. In: FREUDENTHAL, H. (Ed.). **The concept and the role of the model in mathematics and natural and social sciences**. Netherlands: Springer, 1961. p. 163–177.

SUPPES, P. Models of data. In: NAGEL, E.; SUPPES, P.; TARSKI, A. (Ed.). **Logic, methodology, and philosophy of science: proceedings of the 1960 international congress**. Stanford, CA: Stanford Univesity Press, 1962. p. 252–261.

SUPPES, P. **Representation and invariance of scientific structures**. Stanford: Center for the Study of Language and Information, 2002.

TARSKI, A. I: A general method in proofs of undecidability. **Studies in Logic and the Foundations of Mathematics**, v. 13, p. 1–34, 1953.

TAVAKOL, R. Fragility and deterministic modelling in the exact sciences. **The British Journal for the Philosophy of Science**, v. 42, n. 2, p. 147–156, 1991.

TELLER, P. Twilight of the perfect model model. **Erkenntnis**, v. 55, n. 3, p. 393–415, 2001.

TELLER, P. Two models of truth. **Analysis**, v. 71, n. 3, p. 465–472, 2011.

THOMSON-JONES, M. **Models and the semantic view (preprint)**. 1997. Disponível em: <http://philsci-archive.pitt.edu/8994/>.

THOMSON-JONES, M. Models and the semantic view. **Philosophy of Science**, v. 73, n. 5, p. 524–535, 2006.

THOMSON-JONES, M. Missing systems and the face value practice. **Synthese**, v. 172, n. 2, p. 283–299, 2009.

THOMSON-JONES, M. Realism about missing systems. In: LEVY, A.; GODFREY-SMITH, P. (Ed.). **The scientific imagination**: philosophical and psychological perspectives. New York: Oxford University Press, 2020. p. 75–101.

TOON, A. Similarity and scientific representation. **International Studies in the Philosophy of Science**, Routledge, v. 26, n. 3, p. 241–257, 2012.

WATSON, J.; CRICK, F. Molecular structure of nucleic acids: a structure for deoxyribose nucleic acid. **Nature**, v. 171, n. 4356, p. 737–738, 1953.

WESTON, T. Approximate truth and scientific realism. **Philosophy of Science**, v. 59, n. 1, p. 53–74, 1992.

WHITE, F. **Viscous fluid flow**. 2. ed. New York: McGraw-Hill Inc., 2006.

WINTHER, R. G. The structure of scientific theories. In: ZALTA, E. N. (Ed.). **The Stanford encyclopedia of philosophy**. Spring 2021. [S.l.]: Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2021.