

Modelos causais em história da ciência

Oswaldo Pessoa Jr.

Doutor em História e Filosofia da Ciência pela Universidade de Indiana (USA), Professor doutor do departamento de Filosofia, FFLCH, Universidade de São Paulo. *E-mail*: opessoa@usp.br. Financiamento: Fapesp.

Resumo. A investigação de um método para postular histórias contrafactuais da ciência levou ao desenvolvimento de uma teoria da ciência baseada em unidades de conhecimento, chamadas “avanços”. Estes são passados de cientista para cientista, e podem ser vistos como “causando” o surgimento de outros avanços. A descrição de um episódio da história da ciência sob essa perspectiva leva a um “modelo causal” probabilista. Como exemplo, olhamos para o nascimento da ciência do magnetismo, “explicando” – em termos de um único modelo causal – porque o campo avançou na China, mas não na Europa (a diferença seria devido a diferentes probabilidades iniciais atribuídas a certas manifestações culturais). Descrevem-se os aspectos gerais do método de cálculo das probabilidades globais de uma rede (a partir das probabilidades de cada conexão causal individual) e suas limitações.

Palavras-chave: filosofia da ciência, história da ciência antiga, modelo causal, probabilidade.

Abstract. The investigation of a method for postulating counterfactual histories of science has led to the development of a theory of science based on units of knowledge, called “advances”. These are passed from scientist to scientist, and may be seen as “causing” the appearance of other advances. The description of an episode in the history of science from this perspective leads to a probabilistic “causal model”. As an example, we look at the beginning of the science of magnetism, “explaining” – in terms of a single causal model – why the field advanced in China but not in Europe (the difference is due to different prior probabilities of certain cultural manifestations). One describes the general aspects of the method of computation of global probabilities of a network (from the probabilities of each individual causal connection) and its limitations.

Key-words: philosophy of science, history of ancient science, causal model, probability.

1. INTRODUÇÃO

Historiadores da ciência ocasionalmente tecem comentários sobre o que poderia ter acontecido se um certo evento fortuito tivesse sido diferente. Por exemplo, *se* Sadi Carnot não tivesse tido uma morte prematura, e tivesse publicado seu cálculo de 1826 do equivalente mecânico do calor, então o princípio de conservação de energia poderia ter sido antecipado em mais ou menos vinte anos. Esse tipo de afirmação é “contrafactual”, pois se refere a uma situação possível que acabou não se tornando fato. Os seres humanos têm uma excelente habilidade para imaginar cenários contrafactuais (o que certamente tem sua origem na vantagem seletiva que esta capacidade lhes propiciou na evolução biológica). Será que esta habilidade de postular histórias contrafactuais poderia ser assentada em bases mais firmes, por meio de alguma metodologia?

Este projeto se iniciou com um exame das histórias possíveis que levariam ao nascimento da física quântica, a partir da situação da ciência em torno de 1800 (PESSOA, 2000). Argumentou-se que haveria quatro caminhos mais prováveis, além de outras possibilidades mais remotas.

Uma das motivações para esse tipo de estudo é a conexão íntima que existe entre a postulação de histórias contrafactuais e a de causas históricas. Por exemplo, se dissermos que a descoberta da pilha voltaica em 1800 foi uma *causa* necessária para a descoberta da lei eletrodinâmica de Ampère, isto implica a afirmação contrafactual de que *se* a pilha não tivesse sido descoberta antes de 1820, Ampère não teria feito sua descoberta.

Esta ligação entre causas e contrafactuais pode ser usada para tentar superar a resistência que os historiadores têm em aceitar a postulação de histórias contrafactuais. Para fazer isso, pode-se descrever a história da ciência em termos de “modelos causais”, de tal forma que toda informação sobre histórias contrafactuais ficaria contida na descrição das causas.

Modelos causais têm recebido muita atenção nas últimas décadas (ver PEARL, 2000). O problema tratado pelos pesquisadores desta área é o de como inferir relações causais a partir de uma coleção de dados experimentais, que fornecem diretamente apenas “correlações”. A estratégia consiste na escolha de experimentos de “intervenção”, que revelariam as causas envolvidas (e explicariam as correlações). No uso de modelos causais na história da ciência, não é possível inferir as relações causais a partir dos dados, já que a história acontece apenas uma vez, ou, no máximo, duas ou três, no caso de descobertas independentes. Além disso, não se pode, obviamente, intervir na história da ciência. Assim, aproveitaremos desses estudos apenas a notação e a análise de certas estruturas que se formam nas redes de conexões causais.

2. AVANÇOS: UNIDADES DE CONHECIMENTO

Um dos desdobramentos do estudo de histórias contrafactuais foi o desenvolvimento de uma teoria da ciência baseada na noção de “avanço”, que são unidades de conhecimento passadas de um cientista para outro. Há avanços teóricos, como idéias, formulações de problemas, leis, explicações, reconhecimento de semelhanças e distinções, derivações teóricas, comparação teoria-dados etc. Há também avanços experimentais, como a aquisição de dados, desenvolvimento de técnicas experimentais etc. Pode-se também incluir conhecimento tácito, motivações, valores e o uso de regras metodológicas. Cada cientista assimila um conjunto de avanços, seleciona alguns, rejeita outros, combina dois ou mais avanços etc. Qualquer coisa que o cientista faça, que seja anunciada para outros cientistas, e que contribua para a mudança de um campo científico é caracterizada como um avanço. Além das unidades de conhecimento propriamente científicas, há de se levar em conta também manifestações culturais mais gerais que possam desempenhar um

papel causal na ciência, especialmente na ciência nascente, como veremos adiante.

No presente contexto, a palavra “avanço” não deve ser entendida necessariamente como um passo na direção certa, como é sugerido pela definição usual do termo; ela pode se aplicar também a passos na direção “errada”. Sinônimos que poderiam ser mais adequados são “realização”, “contribuição” ou “novidade” (ver PESSOA, 2004).

3. RELAÇÕES CAUSAIS ENTRE AVANÇOS

Quando é feito um avanço, ele pode influenciar o surgimento de outros avanços, tanto para o cientista que o obteve quanto para outros cientistas. Olhando para este processo do ponto de vista de um “cientista da ciência”, pode-se observar que um avanço geralmente contribui como uma *causa* para o surgimento de outro avanço.

Pode acontecer que as condições para o surgimento de um avanço já estejam dadas, mas mesmo assim o avanço não ocorre. Além disso, em geral não conhecemos todos os fatores que estão em jogo. Isso sugere que expressemos a relação entre causas e efeitos de maneira *probabilista*. Dado um certo conjunto de avanços $\{A, B, E\}$, haveria uma certa probabilidade de o avanço F ocorrer dentro de um certo intervalo de tempo de referência T . Expressimos esta probabilidade usando a seguinte notação: $p_T(F/A, B, E)$. Uma causa “fraca” seria um avanço cuja presença aumentaria levemente a probabilidade acima.

Pode também ocorrer que a existência de um avanço contribua de maneira negativa para o aparecimento de outro, diminuindo a probabilidade inicial. Um exemplo tomado da história da astronomia seria a influência negativa que a noção grega de “perfeição da esfera celeste” teve sobre a observação de manchas solares. No Ocidente, esta observação só foi feita por Galileo, mas ela já tinha sido feita pelos chineses no século I d.C.

4. EXEMPLO DE UM MODELO CAUSAL

Daremos agora um exemplo de atribuição de probabilidades em um modelo causal, usando duas histórias factuais, mas independentes, do início da ciência do magnetismo, na China e na Europa. A diferença marcante entre essas duas histórias possíveis foi a descoberta da bússola (ou da propriedade diretiva da magnetita) na China, mas não na Europa. O modelo causal consiste de um diagrama *único*, contendo avanços ligados por relações causais, que dá conta das diferentes histórias (ver Fig. 1). De acordo com a presente reconstrução, baseada em Needham (1962), a diferença entre as duas histórias é devido, principalmente, à forte presença de técnicas de adivinhação na China. Apesar de tais manifestações culturais associadas com a magnetita estarem presentes (em menor grau) também na Europa, por exemplo, na ilha de Samotrácia, simplificamos a situação, considerando que as probabilidades iniciais das técnicas de adivinhação *B* e *E* na Europa seriam nulas, enquanto na China seriam 1. Vale notar também que há evidências fortes de que os primeiros a descobrirem a propriedade diretiva do minério magnético tenham sido o povo meso-americano dos olmecas, antes de 1000 a.C. (CARLSON, 1975).

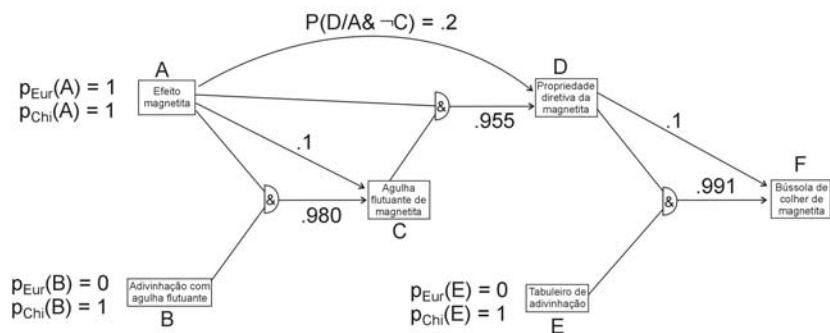


Figura 1: Modelo causal simplificado para o nascimento da ciência do magnetismo

O caminho que levou à primeira bússola magnética, na forma de uma colher de magnetita (F), iniciou-se com a descoberta e exploração do “efeito magnetita” (A) (a atração mútua da magnetita e a atração entre o ferro e a magnetita), que se deram tanto na China quanto na Europa. Porém, na China havia uma técnica de adivinhação feita com uma agulha de ferro untada posta a boiar na água (B), e que levou a uma variação envolvendo uma agulha de magnetita flutuante (C). Com tal arranjo prático, a descoberta de que a agulha de magnetita se alinha na direção norte-sul (D) tornou-se altamente provável, e de fato ocorreu na China em torno do início da Era Cristã, mas não no Ocidente. Depois desta descoberta, o passo era pequeno até o desenvolvimento da bússola rudimentar (F).

Na Fig. 1, algumas relações causais são representadas por probabilidades precisas, e outras por valores imprecisos. Estes últimos são frutos de uma estimativa grosseira, ao passo que os primeiros são calculados de uma maneira a ser explicada adiante. Todos representam a probabilidade de ocorrência de um efeito em um intervalo de tempo de referência $T = 400$ anos.

Alguns avanços, como D , são representados com duas setas chegando e eles: isso exprime uma *disjunção* de caminhos causais, ou seja, o efeito pode surgir ou a partir de um caminho, ou a partir de outro. Uma *conjunção* de causas é representada por setas que apontam para o símbolo “&”. A sucessão de duas relações causais, como $A \rightarrow D$ e $D \rightarrow F$, é chamada de *composição* de causas, que resulta na relação global $A \rightarrow F$.

A probabilidade de um evento F , dado um conjunto de causas como A , B e E , foram expressas para um intervalo de tempo de referência T . Qual seria a expressão para $p_t(F/A,B,E)$ se o intervalo de tempo t escolhido fosse diferente do tempo de referência?

5. PROBABILIDADE COMO UMA FUNÇÃO DO TEMPO

Para tratar esse problema, mudaremos a notação, e escreveremos $p_{Y/X}(t)$ para a probabilidade de ocorrência de um avanço genérico Y , até o tempo t depois da ocorrência de um avanço X . Como se deve exprimir $p_{Y/X}(t)$ em função do tempo t ?

É bastante intuitivo que esta probabilidade $p_{Y/X}(t)$ deve crescer monotonicamente com t (isto é, ela nunca diminui com t). Outra restrição óbvia em $p_{Y/X}(t)$ é que ela nunca pode ser maior do que 1.

Uma maneira simples de exprimir o tempo para que um evento específico ocorra é por meio de uma distribuição *exponencial*: $f(t) = x \cdot e^{-xt}$, usada, por exemplo, na física para descrever o decaimento radioativo. Fazendo a integral temporal desta função, obtém-se a seguinte função de probabilidade cumulativa:

$$p_{Y/X}(t) = 1 - e^{-xt} \quad (1)$$

$x = \frac{-1}{T} \ln(1 - p_{Y/X})$ Neste artigo, faremos a suposição de que, na história da ciência, a probabilidade de que um efeito siga uma causa seja dada por esta lei. Dessa forma, conhecendo a constante de decaimento x , podemos calcular qual será a probabilidade de que um efeito ocorra depois de qualquer intervalo de tempo T , simplesmente calculando $p_{Y/X}(T)$. Tal suposição, é claro, é criticável, e na seção 9 discutiremos seus problemas.

De modo inverso, se estipularmos uma certa probabilidade $p_{Y/X}$ para um tempo de referência T , então a constante de decaimento é dada por:

$$(2)$$

6. ESTIMATIVA DA FUNÇÃO DE PROBABILIDADE

Levando em conta a história da ciência, como associar probabilidades para o aparecimento de um avanço Y ? Primeiro, deve-se avaliar que causas contribuíram para sua ocorrência, e construir um modelo causal qualitativo para o avanço Y . No caso mais simples, tomemos a situação em que um único avanço X é suficiente para a produção de Y . Tal situação poderia se referir ao desenvolvimento de um instrumento científico, como o microscópio composto (X), que levou à descoberta de estruturas celulares em todos os tecidos vegetais (Y).

Vamos supor que, de fato, 6 anos se passaram entre as ocorrências de X e Y . Chamaremos isso de o *intervalo de tempo empírico* t do processo causal $X \rightarrow Y$. Qualquer que seja a distribuição de probabilidade do processo subjacente, a melhor estimativa é que t corresponda ao tempo médio \bar{T} das ocorrências do evento nos mundos possíveis. Para a função de probabilidade cumulativa exponencial, a média é simplesmente o inverso da constante de decaimento: $\bar{T} = 1/x$ (Ross, 1997, p. 236). Assim, igualando a média \bar{T} e o intervalo de tempo empírico t , pode-se estimar $p_{Y/X}(t)$, de acordo com a eq.(1), fazendo:

$$x = 1 / t \quad (3)$$

Tal resultado é independente de qualquer hipótese relativa ao intervalo de tempo de referência T de uma situação histórica. No exemplo precedente, para $t = 6$ anos, encontra-se $x = 0,167 \text{ anos}^{-1}$. No entanto, se quisermos exprimir probabilidades, temos que fixar um intervalo de tempo de referência. Para a física europeia do séc. XIX, podemos supor que tal intervalo de referência fosse 10 anos. Assim, usando a eq.(1), obtém-se $p_{Y/X}(10 \text{ anos}) = 0,81$.

7. COMPOSIÇÃO, DISJUNÇÃO E CONJUNÇÃO DE CAUSAS

Dado que X causa Y com uma certa probabilidade $p_{Y/A}(T)$, e que Y causa Z com probabilidade $p_{Z/Y}(T)$, qual seria a probabilidade $p_{Z/A}(T)$ associada com a *composição* de causas?

Supõe-se a eq.(1) e uma equação análoga para o segundo processo: $p_{Z/Y}(t) = 1 - e^{-yt}$. Sem entrar nos detalhes matemáticos (ver Pessoa, 2006), o resultado $p_{Z/X}(t)$ para a composição (ou “convolução”) dessas duas causas é:

$$p_{Z/X}(t) = [x \cdot p_{Z/Y}(t) - y \cdot p_{Y/X}(t)] / (x-y) \quad (4)$$

Isso pode ser generalizado para a composição de qualquer número de causas. Na matemática, este resultado é chamado de distribuição “hipo-exponential” (Ross, 1997, pp. 246-8), ao passo que na física é conhecida como equações de Bateman (Evans, 1955, cap. 15).

O caso da *disjunção* ocorre quando um certo avanço pode surgir de maneira *independente* por mais de um caminho causal. Por exemplo, podemos ter as seguintes relações causais independentes: $X \rightarrow Z$, com probabilidade $p_{Z/X}(t)$, e $Y \rightarrow Z$, com $p_{Z/Y}(t)$. Qual seria então a probabilidade da disjunção de possibilidades $p_{Z/X \& Y}(t)$, dado que ambos X e Y estão presentes em um certo instante inicial?

O problema é análogo à probabilidade de jogar dois dados e obter pelo menos uma face “seis”. Há uma probabilidade de 1/6 de obter um “seis” com o primeiro dado, e 1/6 para o segundo, mas depois de somar as probabilidades, devemos subtrair 1/36 porque a jogada de dois “seis” foi contada duas vezes: o resultado é 11/36.

A probabilidade no caso da disjunção de caminhos causais, em que cada causa é suficiente para produzir o efeito, com probabilidades $p_{Z/X}(t)$ e $p_{Z/Y}(t)$, é portanto:

$$p_{Z/X \& Y}(t) = p_{Z/X}(t) + p_{Z/Y}(t) - p_{Z/X}(t) \cdot p_{Z/Y}(t) \quad (5)$$

O caso em que duas causas são suficientes, apenas em *conjunção*, para a produção de um efeito, não pode ser relacionada às probabilidades dos termos individuais, já que cada um, por si só, é insuficiente (probabilidade 0). Neste caso, então, a probabilidade conjunta $p_{Z/X\&Y}(t) = 1 - e^{-zt}$ precisa ser dada.

No caso em que os termos X e Y , que compõem a conjunção, não são dados com certeza, mas têm probabilidades p_X e p_Y de ocorrerem, a probabilidade conjunta original $p_{Z/X\&Y}(t)$ deve ser multiplicada pela probabilidade de que ambos, X e Y , ocorram, que é $p_X \cdot p_Y$.

Outras situações mais complicadas podem ser resolvidas por integração (ver Pessoa, 2006).

8. EXEMPLO DE COMPUTAÇÃO DE PROBABILIDADES

Os resultados mencionados acima podem ser usados para calcular a probabilidade global $p_T(F)$ associada à Fig. 1, para o caso da China e da Europa. O tempo de referência é tomado como sendo $T = 400$ anos. Retornamos para a notação usada na seção 4.

Na Figura 1, as probabilidades com três algarismos significativos foram calculadas a partir do intervalo de tempo empírico t entre as descobertas que de fato ocorreram na China. O avanço A corresponde ao registro do efeito magnetita feito por Pu Wei em 220 a.C., enquanto que o avanço C corresponde ao relato da agulha de magnetita flutuante feito por Liu An em 120 a.C. (NEEDHAM, 1962, p. 232, 281). Com esses dados, usam-se as eqs. (2) e (3), com $\tau_{C/A} = 100$ anos, para calcular a probabilidade 0,982. Esta, porém, corresponde à disjunção dos caminhos $A\&B$ e A (ou seja, $A\&-B$). Aplicando a eq.(5), obtém-se $p(C/A\&B) = 0,980$, conforme expresso na Figura 1.

A mesma análise se aplica à ocorrência dos avanços D e F . No primeiro caso, supomos que a propriedade diretiva da magnetita foi descoberta no ano 0 da Era Cristã, de forma que o intervalo

empírico é de 120 anos entre as ocorrências de C e D na China. O caso final envolve um intervalo de tempo empírico de 83 anos entre a ocorrência estimada de D e a descrição de Wang Chung da bússola rudimentar, a colher de magnetita usada em um tabuleiro de adivinhação, em 83 d.C. (NEEDHAM, 1962, p. 233, 237, 261-2).

Para calcular a probabilidade global para a invenção da bússola rudimentar na China, aplicam-se as regras expostas anteriormente, supondo as seguintes probabilidades iniciais: $p_{\text{Chi}}(A) = p_{\text{Chi}}(B) = p_{\text{Chi}}(E) = 1$. O resultado obtido para a probabilidade de a bússola surgir na China em 400 anos é $p_{\text{Chi}}(F) = 0,76$.

No caso da Europa, supomos $p_{\text{Eur}}(A) = 1$ e $p_{\text{Eur}}(B) = p_{\text{Eur}}(E) = 0$. O cálculo da probabilidade global fornece $p_{\text{Eur}}(F) = 0,02$, uma probabilidade estimada bastante pequena para que a bússola fosse desenvolvida na Europa depois de 400 anos da descoberta das propriedades da magnetita.

9. DISCUSSÃO

Dessa maneira, um modelo causal único “explica” dois caminhos independentes da ciência. É claro que o exemplo é completamente *ad hoc* (ou seja, foi construído artificialmente para explicar algo que já sabíamos), mas ele resume a interpretação de Needham de porque a ciência do magnetismo se desenvolveu de maneiras tão diferentes nesses dois mundos possíveis (e factuais). Modelos causais são uma maneira de codificar a informação obtida com esforço pelos historiadores da ciência. O uso de números não reflete qualquer suposição filosófica de que tais números realmente existam na realidade da história da ciência; trata-se apenas de uma maneira de codificar a informação histórica para que computadores possam nos auxiliar na compreensão da evolução da ciência.

Uma objeção ao uso de funções de distribuição exponencial, na modelagem do surgimento de avanços, é que, na realidade, a

ocorrência de qualquer avanço é o resultado de complicadas cadeias de eventos causais, cada qual seguindo uma distribuição exponencial. Assim, a distribuição resultante não poderia ser exponencial, e talvez uma função de distribuição semelhante ao caso hipo-exponencial (mencionada na seção 7) fosse mais adequada (ver PESSOA, 2006). É plausível supor que certos tipos de avanços sigam aproximadamente uma distribuição exponencial, como descobertas que surgem da exploração cega de novos territórios. Mas outros tipos de avanços, como a solução de um quebra-cabeça envolvendo muitos ingredientes, requereriam passos intermediários, o que certamente não seria bem modelado pela função exponencial.

De um ponto de vista metafísico, pode-se defender que existam conexões causais elementares, que não surjam da composição de elos causais menores. Elas seriam reconhecidas justamente por seguirem uma distribuição exponencial, como no caso do decaimento radioativo. A posição metafísica realista, de que todas as conexões causais surgem da composição de elos causais exponenciais elementares ou “atômicos”, pode ser chamada de *atomismo causal*.

A justificativa para o uso de funções exponenciais é sua simplicidade (especialmente adequada para integração) e nossa ignorância das cadeias subjacentes de processos causais. Mesmo assim, o formalismo resultante é bastante complicado para ser aplicado em grandes redes causais. Na prática, seria interessante que se desenvolvessem métodos aproximados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARLSON, J. B. Lodestone Compass: Chinese or Olmec Primacy? **Science**, Washington, v. 189, n. 4205, p. 753-60, 5 set. 1975.

EVANS, R. D. **The Atomic Nucleus**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1955.

NEEDHAM, J. **Science and Civilization in China**, v. 4: Physics and Physical Technology, part I: Physics. Escrito em colaboração com W. Ling e K.G. Robinson. Cambridge: Cambridge University Press, 1962.

PEARL, J. **Causality: Models, Reasoning and Inference**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

PESSOA JR., O. Histórias Contrafactuais: O Surgimento da Física Quântica. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 14, n. 39, p. 175-204, 2000.

_____. Unidades de Conhecimento na Teoria da Ciência. **Philosophos**, Goiânia, v. 9, p. 207-24, 2004.

_____. **Métodos Físicos para se Estudar a História da Física**. São Paulo, 2006. [No prelo], pelo Instituto de Física Teórica, São Paulo, 2006.

ROSS, S. M. **Introduction to Probability Models**. 6 ed. San Diego: Academic, 1997.

Recebido em: maio de 2006

Aprovado em: junho de 2006