
A INSUSTENTABILIDADE DA PROPOSTA INDUTIVISTA DE “DESCOBRIR A LEI A PARTIR DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS”⁺*

Fernando Lang da Silveira
Fernanda Ostermann¹
Instituto de Física – UFRGS
Porto Alegre - RS

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar argumentos que ilustrem a insustentabilidade da lógica indutiva como método de produção de conhecimento, a partir de um exemplo de prática de laboratório usualmente realizada nas aulas de Física – a "descoberta da Lei do Pêndulo Simples". Apesar do empirismo-indutivismo constituir-se atualmente em uma teoria do conhecimento ultrapassada entre os epistemólogos, filósofos e historiadores da ciência, ela ainda sobrevive no ensino da Física. Pode-se constatar o predomínio dessa visão através, por exemplo, de pesquisas sobre concepções de professores, de análises de livros didáticos de Ciências e/ou de Física, de manuais de laboratório e de documentos oficiais.

Palavra-chave: *Filosofia da Ciência; empirismo-indutivismo; laboratório de Física; ensino de Física.*

Abstract

The aim of this piece of work is to present arguments that illustrate the unsustainability of inductive logic as a method for the produc-

⁺ The insustainability of the inductivist proposal of “discovering the law from experimental results”

* *Recebido: agosto de 2001.*
Aceito: novembro de 2001.

¹ Com auxílio parcial do CNPq.

tion of knowledge, through an example of laboratory practice commonly used in Physics classes – the “discovery of the simple pendulum law”. Despite empiricism-inductivism being currently regarded amongst epistemologists, philosophers and historians of science as an outdated theory of knowledge, it continues to survive in Physics teaching. One can demonstrate predominance of this view through, for example, studies on teachers’ conceptions, analyses of Science and/or Physics textbooks, and of laboratory manuals and official documents.

1. Introdução

A partir da década de 30 do século XX, com os trabalhos de vários epistemólogos e historiadores da ciência, a concepção empirista-indutivista de ciência começou a ser mais fortemente questionada. Ainda na Antiguidade Clássica, Aristóteles (384-332 a.C.) propusera o chamado método indutivo-dedutivo para a produção de conhecimento, mas é no século XVI, que a sistematização feita por Bacon (1561 – 1626), torna essa visão hegemônica. Apesar da disputa entre racionalistas e empiristas se reportar a Platão (428/7-348/7 a.C.) e seu discípulo Aristóteles e se perpetuar ao longo da história do pensamento ocidental, foi com o advento dos grandes desenvolvimentos científicos renascentistas que a visão baconiana começou a se consolidar como a resposta óbvia e inquestionável ao problema da natureza da ciência. A partir do século XVII, os trabalhos dedicados à questão metodológica manifestavam propensão a creditar a superioridade explicativa da ciência, em oposição às pseudociências e às especulações, ao fato de se devotar a meticulosas e rigorosas observações a partir das quais se formavam, via indução, as teorias científicas. Por outro lado, o racionalismo, com sua tendência de caracterizar as ciências como sistemas dedutivos, não exerceu tanta influência sobre a epistemologia corrente, possivelmente, por não ter dado destaque ao problema da demarcação, isto é, ao estabelecimento de linhas divisórias entre o metafísico e o científico (Oliva, 1990).

As críticas contemporâneas à visão empirista-indutivista de ciência acumulam-se e permitem reconhecer, entre os diversos filósofos e historiadores da ciência, um núcleo comum. A inseparabilidade entre pressupostos teóricos e observações foi sustentada de maneira convincente por, entre outros, Popper (1975), Kuhn (1978), Hanson (1979) e Feyerabend (1993). Kuhn (1978) defendeu que uma comunidade científica, ao adquirir um paradigma, assume também um critério para a escolha de problemas que, enquanto o paradigma for aceito, podem ser considerados como passíveis de uma solução (apud Ostermann, 1996). Popper (apud Silveira, 1996a) demonstrou, a partir de uma contundente argumentação, que a indu-

ção não se sustenta logicamente. Chalmers (1987) criticou duramente a visão empirista-indutivista de ciência, negando a possibilidade de justificar-se o princípio da indução e combateu a chamada concepção popular de observação, na qual as experiências visuais estariam determinadas unicamente por imagens formadas na retina. Laudan (1977), ao considerar que a ciência é, em essência, uma atividade de resolução de problemas, propôs que para avaliar os méritos das teorias científicas é mais importante perguntar se constituem soluções adequadas a problemas relevantes, do que perguntar se são "verdadeiras", estão "corroboradas", "bem confirmadas". Koyré (1986) desenvolveu a idéia de que Galileu não recorreu a experiências como a historiografia empirista relatava; ele argumentou que houve uma tendência exagerada em se acreditar que o físico italiano "descobriu" seus principais esquemas teóricos graças à observação e à experiência. Bunge (1973) atacou a concepção empirista na versão por ele intitulada de "*Credo do Físico Inocente*".

Esses são alguns exemplos de como os filósofos e historiadores da ciência contemporâneos têm sustentado sua oposição à visão empirista-indutivista de desenvolvimento científico. No entanto, conforme atesta Matthews (1995), é só a partir da década de 90 do século XX que se inicia uma aproximação maior entre história, filosofia e ensino de Ciências. Essa interação engloba vários aspectos: a inclusão de componentes de história e filosofia da ciência (HFC) em vários currículos nacionais (Duschl, 1985), a inspiração para reformas curriculares (Krasilchik, 1990), o paralelismo que pode se estabelecer com a psicologia da aprendizagem (Piaget e Garcia, 1989), o reconhecimento do papel da idealização em ciência (Steinberg et al, 1990), a sua importância na formação de professores (Matthews, 1990).

Possivelmente, essa aproximação de que fala Matthews refere-se muito mais à comunidade acadêmica do que ao dia-a-dia do trabalho do professor em sala de aula (Abell e Smith, 1994; Gustafson e Rowell, 1995; Koulaidis e Ogborn, 1995). Porlán et al (1997, 1998), em um estudo junto a 158 professores em exercício e 131 futuros professores de Ciências, constataram que a imagem de ciência predominante é o empirismo, especialmente entre professores com maior tempo de experiência. Gil et al (1991) e Carvalho e Gil (1998), ao discutirem as necessidades formativas dos professores de Ciências, destacam, entre outros aspectos, que é preciso promover a ruptura com visões simplistas sobre o ensino de Ciências e questionar as idéias docentes de "*senso comum*". O "*pensamento docente espontâneo*" inclui uma visão ingênua do que é a ciência e o trabalho científico, alinhando-se à concepção empirista-indutivista. Esta só poderá ser superada a partir de um bom domínio da matéria a ser ensinada por parte do professor, o que envolve o conhecimento de HFC e suas implicações para o ensino de ciências (Abd-el-Khalick et al, 1998; Furió, 1994; Gil, 1993; Gil et al, 1991; Carvalho e Gil, 1998; Níaz, 1994).

Por um lado, vê-se um esforço da comunidade acadêmica em contemplar, na formação inicial e continuada de professores, mudanças que incorporem conhecimentos sobre HFC e suas contribuições ao ensino de ciências. Por outro, há ainda livros didáticos, recentemente publicados, que insistem em perpetuar uma concepção de ciência já superada. Por exemplo, um livro de ciências muito adotado na 6ª série do ensino fundamental brasileiro (Barros e Paulino, 1999) apresenta, em seu primeiro capítulo, o tema "*A investigação científica*". O "*método científico*" é descrito como sendo a "*maneira organizada*" com que trabalham os cientistas (op. cit. p.8):

Investigando algum fenômeno, os cientistas trabalham de maneira organizada, usando um método científico. Veremos, a seguir, como pode se desenvolver um método científico...

... Assim, um método científico pode seguir as seguintes etapas: observação de um fato, formulação de um problema, formulação de uma hipótese, realização de experiências, conclusão...

Apesar de ser uma obra recentemente reeditada, continua sendo ensinada aos estudantes uma fórmula rígida e infalível de se produzir conhecimento científico, tal como abordavam textos anteriormente investigados (Moreira e Ostermann, 1993). O Programa Nacional do Livro Didático – PNLD – uma importante iniciativa implementada pelo governo brasileiro desde 1996, avaliou cerca de 65 livros didáticos de Ciências de 5ª a 8ª séries do ensino fundamental, dentre os quais, apenas 30 foram "*recomendados*" ou "*recomendados com ressalvas*" (nenhum "*recomendado com distinção*"). No conjunto dos "*recomendados*", aparece a obra citada anteriormente (PNLD, 1999, p.355), sendo que na descrição da análise feita do texto não há nenhuma crítica à visão de ciência por este veiculada. Pelo contrário, a avaliação destaca que a obra estimula a pesquisa por parte dos alunos, referindo-se à página na qual aparecem as seguintes questões: "*O que é método científico?*", "*Quais as etapas do método científico?*". Isto demonstra que, do ponto de vista do ensino de ciências, ainda predomina a concepção empirista-indutivista de produção de conhecimento, apesar dos esforços de epistemólogos, historiadores e de pesquisadores em ensino de ciências. Quando se analisam documentos oficiais que traçam diretrizes para o ensino de Ciências, os resultados são praticamente os mesmos. Por exemplo, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) para as Ciências Naturais de 5ª a 8ª séries, divulgados em 1998, pelo governo federal, propõem a ampliação da visão de conteúdo para além dos conceitos, inserindo procedimentos, atitudes e valores como conhecimentos tão relevantes quanto os conceitos tradicionalmente ensinados. Como objetivos gerais das Ciências Naturais para o ensino fundamental, destacam o desenvolvimento de competências, dentre as quais, a compreensão da ciência como um processo de produção de conhecimento e uma atividade humana, histórica, associada a aspectos de ordem social, econômica, política e cultural.

Apesar disso, formulam uma crítica tímida e pouco fundamentada com respeito à visão de ciência tão amplamente divulgada nas aulas de ciências: "... os PCN reconhecem que é impreciso definir as etapas de um método científico e igualmente significativo para todas as Ciências e suas diferentes abordagens..." (PCN, 1998). Claramente, tal afirmativa é pouco esclarecedora dos problemas dessa concepção, acabando por se perder a oportunidade de combater uma idéia epistemologicamente ultrapassada, mas hegemônica nos livros e na visão de professores.

Quanto a livros de Física para o ensino médio², é possível também encontrar obras recentes, de boa qualidade, que ainda insistem em caracterizar a Física através de seu "*método experimental*". Amaldi (1995) afirma que essa ciência se baseia nas observações e nas experiências, permitindo formular as leis físicas, habitualmente expressas por fórmulas matemáticas. No primeiro capítulo, descreve (op. cit. p. 7-8):

... O método experimental da Física consiste em uma sábia combinação de observações e experiências, que têm o propósito de esclarecer os aspectos essenciais dos fenômenos naturais. Sem recorrer à experiência não seria possível distinguir num fenômeno aquilo que é importante daquilo que, numa primeira abordagem, pode ser desprezado. Com o auxílio do método experimental, é possível compreendê-los através de passos sucessivos...

... Esse método que começa com a observação do fenômeno, utiliza experiências, analogias e hipóteses e finalmente chega à lei que rege o fenômeno – é chamado método indutivo...

Em uma revista brasileira, de ampla penetração junto a professores da rede de ensino, também foi possível verificar que a concepção empirista-indutivista continua sendo veiculada. Em uma reportagem sobre inovações didáticas nas aulas de Ciências, comenta-se que (p.21): "... a experiência foi um sucesso porque as professoras seguiram os passos da metodologia científica...".

Do ponto de vista do ensino superior, a prova que avalia os cursos de graduação em Física, através de um exame aplicado a estudantes de último ano, define uma série de habilidades necessárias aos concluintes do curso de Física. Segundo esse documento oficial, umas das capacidades a ser demonstrada pelo graduando é a de entender "*o método empírico*"³, *saber avaliar a qualidade dos dados e formu-*

² A avaliação de livros didáticos para o ensino médio brasileiro ainda não foi concluída pelo MEC.

³ O documento não esclarece o que é o *método empírico*.

lar modelos, identificando seus domínios de validade”. Vê-se, mais uma vez, a difusão de uma idéia ultrapassada acerca da natureza da ciência.

É possível, portanto, verificar que, em diferentes níveis, a concepção empirista-indutivista de ciência permanece praticamente inabalável. Como isso é possível frente ao acúmulo de argumentos epistemológicos que a contrariam? E os esforços de uma aproximação entre HFC e o ensino de ciências não têm sido eficazes para sua superação? Nossa experiência em formação inicial e continuada de professores de Física e Ciências tem evidenciado que a tarefa de problematizá-la não é trivial, pois esta mostra-se profundamente arraigada e resistente a mudanças. É impossível tentar desacreditá-la em poucas aulas e com argumentos superficiais e pouco convincentes. É preciso construir **estratégias didáticas**, inspiradas em epistemologias contemporâneas, a fim de promover o entendimento de que o programa empirista-indutivista é regressivo e degenerou –no sentido de Lakatos (1987, 1989) – se comparado a outros enfoques mais modernos. O objetivo do presente trabalho é justamente apresentar argumentos que utilizamos em cursos de formação inicial e continuada de professores com o objetivo de mostrar a insustentabilidade da indução como método de produção de conhecimento. Para tanto, apresentamos, como exemplo, uma prática de laboratório frequentemente realizada nas aulas de Física – a “descoberta” da Lei do Pêndulo Simples. A motivação para implementar tal abordagem tem origem nos resultados que obtivemos com a aplicação de um questionário construído e validado por Harres (1999). O objetivo deste instrumento é detectar as concepções de professores sobre a natureza da ciência. Ao longo dos últimos dois anos, temos corroborado os resultados já encontrados na literatura e que apontam para a visão amplamente compartilhada de que a ciência segue uma seqüência rígida de passos, começando com a observação e culminando em uma descoberta.

II. O problema da indução

Segundo a epistemologia empirista-indutivista o conhecimento em geral, e o científico em especial, tem como base segura a observação e a experimentação. Aristóteles já afirmara que “*nada há no intelecto que antes não tenha estado nos órgãos dos sentidos*”. Segundo os empiristas, as proposições científicas com alto nível de generalidade – as leis, os princípios, as teorias – são obtidas a partir de resultados observacionais, dos enunciados que descrevem algo observado, experimentado. A indução é o processo que conduz dos enunciados observacionais (enunciados singulares) aos enunciados universais. Um exemplo de raciocínio indutivo é o seguinte:

Base indutiva: foi observado em diversos locais da Terra, durante um longo período de tempo, que o Sol nasce (se eleva acima do horizonte) a cada 24 horas aproximadamente.

Generalização: o Sol nascerá a cada 24 horas aproximadamente.

Entretanto, os próprios indutivistas colocaram-se o "*problema da indução*": Como se justifica a passagem dos enunciados observacionais para os enunciados universais? "*Qual é o fundamento de todas as conclusões a partir da experiência?*" (Hume, 1985, p. 37). David Hume (1711 – 1776), filósofo empirista escocês, negou haver justificativa para a indução: "*Que o sol não se há de levantar amanhã, não é uma proposição menos inteligível e não implica maior contradição, do que a afirmação de que ele se levantará*" (Hume, 1985, p. 32). No século XX, conforme notamos na seção anterior, vários epistemólogos, historiadores da ciência e cientistas negaram que o conhecimento científico possa ser derivado apenas de observações. Einstein reconheceu, em suas notas autobiográficas, que na formulação da Teoria da Relatividade andou por caminhos muito distantes daqueles apontados pelos empiristas, considerando como prejudicial a concepção que "*consiste em acreditar que os fatos podem e devem fornecer, por si mesmos, conhecimento científico, sem uma construção conceptual livre*" (Einstein, 1982, p. 52). Ele foi explícito em relação à insuficiência do programa empirista quando assim se pronunciou:

Sabemos agora que a ciência não pode se desenvolver apenas a partir do empirismo; nas construções da ciência, precisamos da invenção livre, que só a posteriori pode ser confrontada com a experiência para se conhecer sua utilidade. Este fato pode ter escapado às gerações anteriores, para as quais a criação teórica parecia desenvolver-se indutivamente a partir do empirismo, sem a criativa influência de uma livre construção de conceitos. (Einstein apud Pais, 1995 p. 14)

Ou ainda:

Ora, está longe de ser óbvio de um ponto de vista lógico, haver justificativa no inferir enunciados universais de enunciados singulares, independentemente de quão numerosos sejam estes; com efeito, qualquer conclusão colhida desse modo sempre pode revelar-se falsa; independentemente de quantos cisnes brancos possamos observar, isso não justifica a conclusão de que todos os cisnes são brancos. (Popper, 1985, p. 27/28)

Apesar do empirismo-indutivista constituir-se atualmente em uma teoria do conhecimento ultrapassada entre os epistemólogos, filósofos e historiadores das ciências, ela ainda sobrevive no ensino da Física. Uma instância da indução pode ser encontrada nas propostas de atividade de laboratório, onde o aluno deverá "*descobrir a lei*" que relaciona duas variáveis estudadas experimentalmente. Por

exemplo, Bernard e Epp (1995) propõem um experimento intitulado *"O período de um pêndulo – uma aplicação do método experimental"*, no qual o aluno medirá o período de um pêndulo – constituído por uma esfera suspensa em um fio – para diversos comprimentos desse pêndulo. Em seguida, aqueles autores apresentam um procedimento matemático que permitirá *"descobrir a Lei do Pêndulo Simples"*.

O *"problema de como descobrir a função"* que descreve um conjunto de pares ordenados (resultados de medidas para duas variáveis) foi exaustivamente estudado por incontáveis epistemólogos (entre outros, Goodman (1978), Hempel (1981), Chomski e Fodor (1987) e Watkins (1982)), pois, como já notamos anteriormente, tem relação direta com o *"problema da indução"*.

Utilizaremos o experimento proposto por Bernard e Epp para exemplificar o *"problema de como descobrir a lei a partir de resultados experimentais"*. Para tanto seguiremos os passos que eles sugerem.

III. O experimento do pêndulo e a descoberta da lei

O pêndulo constituiu-se de uma esfera homogênea com cerca de 3 cm de raio, suspensa por um fio fino a um suporte. Segundo a proposta dos autores, o comprimento do pêndulo é a distância entre o ponto de suspensão e o centro da esfera (como ela é homogênea, este ponto coincide com o centro de gravidade). Variamos esta distância entre 10 cm e 190 cm conforme a tabela 1; para cada comprimento D, determinamos o período a partir da medida do tempo de 20 oscilações.

Tabela 1: Resultados experimentais para o comprimento (D) e o período (T) do pêndulo.

D (cm)	T (s)	D (cm)	T (s)
10	0,65	110	2,11
30	1,14	130	2,26
50	1,42	150	2,52
70	1,65	170	2,62
90	1,87	190	2,80

Os autores continuam da seguinte forma:

Uma observação casual revela que o período do pêndulo torna-se menor (ou maior) quando o comprimento do fio é encurtado (aumentado). Isto indica que o período T pode estar relacionado com o comprimento D por uma relação como:

$$T = k D^n \quad (1)$$

onde n é o expoente e k é a constante de proporcionalidade. (...)

Outra maneira de resolver o problema de encontrar a relação é por tomar o logaritmo da equação 1. Desta forma:

$$\log T = n \log D + \log k \quad (2)$$

Esta é a equação da reta quando $\log T$ é colocado em um gráfico como função do $\log D$. A declividade da reta é n e a interseção com o eixo y é $\log k$. Esta é uma maneira rápida e fácil de encontrar n e k . (Bernard e Epp, 1995; p. 32)

Seguindo a sugestão, traçamos o gráfico e calculamos a declividade da reta, bem como a interseção desta com o eixo das ordenadas; finalmente chegamos à "Lei do Pêndulo Simples". A Fig. 1 apresenta tais resultados.

Ou seja, os resultados experimentais nos permitiram, sem qualquer outro pressuposto⁴, encontrar a equação que relaciona o período do pêndulo com o seu comprimento.

IV. Crítica ao procedimento utilizado

A nossa crítica à pretensão de "descobrir a lei a partir de resultados experimentais" poderia se ater ao problema da generalização da equação encontrada. Afinal utilizamos um pêndulo, com uma determinada forma, constituído por um específico material, em um determinado local... Será que a "lei descoberta" desta maneira é válida para outros pêndulos (de outros materiais, em outros locais...)? Entretanto, mostraremos que a etapa anterior à generalização – a etapa da "descoberta da lei" – já padece de problemas insanáveis.

⁴ O verdadeiro conhecimento somente é possível, segundo o empirismo-indutivista de Bacon (1561 – 1626), se abandonarmos todos os pressupostos, os preconceitos: "O intelecto deve ser liberado e expurgado de todos eles, de tal modo que o acesso ao reino do homem, que repousa sobre as ciências, possa parecer-se ao acesso ao reino dos céus, ao qual não se permite entrar senão sob a figura de criança" (Bacon, 1984; p. 38. Grifo no original). Na versão do século XX – isto é, na versão do empirismo lógico de Círculo de Viena dos anos 20 e 30 –, a lógica e a matemática são *a priori* da experiência; o cientista entra armado com elas em seu laboratório. O encaminhamento do experimento "O período de um pêndulo – uma aplicação do método experimental" segue o ideal empirista, pois nenhuma teoria prévia sobre o pêndulo é apresentada; os resultados experimentais e a matemática são suficientes para se encontrar a lei.

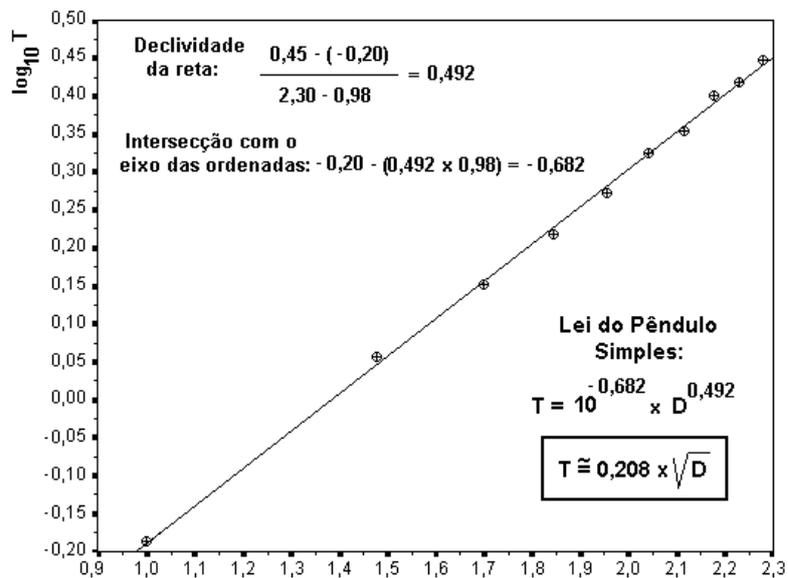


Fig. 1 - Obtenção da Lei do Pêndulo Simples.

A "descoberta da lei" contém, implicitamente, o pressuposto de que há somente uma equação capaz de descrever o conjunto de resultados experimentais. Todavia existem virtualmente infinitas funções que descrevem, com o grau de aproximação que se desejar, os mesmos resultados; além disso, existem infinitas funções que descrevem exatamente estes mesmos resultados⁵. A seguir exemplificaremos algumas destas infinitas funções com as medidas da tabela 1.

O procedimento utilizado na figura 1 foi o de traçar "a olho" uma reta que passe por perto de todos os pontos experimentais. Depois, dois pontos desta reta (que não passa por nenhum dos pontos experimentais, conforme se observa na figura 1) foram utilizados para calcularmos a declividade da reta e a intersecção com o eixo das ordenadas.

⁵ Um polinômio com grau $m = (n - 1)$, onde n é o número de pontos experimentais, passa exatamente por esses pontos. Existem infinitos polinômios de grau $m \geq n$ que passam exatamente pelos pontos. Também existem infinitas outras funções, com n parâmetros a serem determinados a partir dos resultados experimentais, que se ajustam perfeitamente aos pontos experimentais.

O procedimento formal para se determinar os parâmetros (as constantes) da função ajustada é denominado na literatura especializada de *regressão* (Mandel, 1984). Utilizamos o programa estatístico "SPSS for Windows – Versão 10.0" para procedermos, por *regressão*, o ajuste de diversas funções.

Inicialmente ajustamos uma função, pelo *método dos mínimos quadrados*⁶, do tipo sugerido por Bernard e Epp e encontramos o seguinte resultado: $\hat{T}=0,199D^{0,503}$. A tabela 2 apresenta, além dos valores obtidos experimentalmente, os valores calculados pela equação de *regressão* e o *somatório dos quadrados dos resíduos* (SQ).

Tabela 2 - Resultados experimentais, valores calculados pela equação de regressão $\hat{T}=0,199 D^{0,503}$ e somatório dos quadrados dos resíduos.

D (cm)	T (s)	\hat{T} (s)		D (cm)	T (s)	\hat{T} (s)
10	0,65	0,634		110	2,11	2,117
30	1,14	1,101		130	2,26	2,302
50	1,42	1,424		150	2,52	2,474
70	1,65	1,686		170	2,62	2,635
90	1,87	1,914		190	2,80	2,787
				$SQ = \sum [T - \hat{T}]^2 = 0,0093 \text{ s}^2$		

Nota-se que a equação obtida se ajusta bastante bem aos pontos experimentais: os valores calculados diferem no máximo por centésimos de segundo dos valores medidos; o *somatório dos quadrados dos resíduos* é pequeno quando comparado com o *somatório dos quadrados dos desvios em relação à média* dos períodos⁷ (este segundo somatório vale $4,3200 \text{ s}^2$). O *método dos mínimos quadrados*

⁶ O *método dos mínimos quadrados* determina os valores dos parâmetros (constantes) da equação de *regressão* minimizando o *somatório dos quadrados dos resíduos* (resíduo é a diferença entre o valor obtido experimentalmente e o valor estimado pela equação de *regressão*). Existem, virtualmente, infinitos métodos de ajustamento; o pacote estatístico que utilizamos permite que o usuário, além de optar pela função de ajustamento, escolha também um método. A necessidade de se fazer tais opções mostra que os dados não falam por si.

⁷ Subtraindo-se da unidade a razão entre o *somatório dos quadrados dos resíduos* e o *somatório dos quadrados dos desvios em relação à média da variável dependente* (neste caso o

também produz estimativas de erro para os parâmetros da função de regressão; neste caso os parâmetros são $0,199 \text{ s.cm}^{-0,503}$ com erro de $0,010 \text{ s.cm}^{-0,503}$ e $0,503$ com erro de $0,011$. Portanto, o expoente da equação de *regressão* não é exatamente $0,50$ mas um valor compreendido entre $0,48$ e $0,52$, caso adotemos um nível de confiança de 95% (o intervalo de confiança a 95% é construído somando e subtraindo ao valor do parâmetro cerca de duas vezes o erro do parâmetro).

Entretanto esta não é a única função que adere bastante bem aos pontos experimentais. Por exemplo, como se observa na tabela 3, a função $\hat{T}=0,150D^{0,4}+0,067D^{0,6}$ se ajusta um pouco melhor. Note-se que o *somatório dos quadrados dos resíduos* é um pouco menor para esta segunda função do que para a anterior.

Tabela 3- Resultados experimentais, valores calculados pela equação de **regressão** $\hat{T}=0,150D^{0,4}+0,067D^{0,6}$ e somatório dos quadrados dos resíduos.

D (cm)	T (s)	\hat{T} (s)	D (cm)	T (s)	\hat{T} (s)
10	0,65	0,644	110	2,11	2,108
30	1,14	1,100	130	2,26	2,294
50	1,42	1,418	150	2,52	2,467
70	1,65	1,678	170	2,62	2,630
90	1,87	1,904	190	2,80	2,784

$$SQ = \sum [T - \hat{T}]^2 = 0,0080 \text{ s}^2$$

Para este segundo ajuste, dois parâmetros também foram determinados pelo *método dos mínimos quadrados*: $0,150 \text{ s.cm}^{-0,4}$ com erro de $0,016 \text{ s.cm}^{-0,4}$ e $0,067 \text{ s.cm}^{-0,6}$ com erro de $0,006 \text{ s.cm}^{-0,6}$. Os expoentes desta função foram escolhidos *a priori*, portanto não calculados a partir dos dados experimentais e, consequentemente, não sujeitos a erros.

A Fig. 2 apresenta o gráfico das duas funções ajustadas, bem como de mais duas funções que aderem ainda melhor aos pontos experimentais. As duas

período), obtém-se uma estatística adimensional com valor no intervalo fechado (0; 1), denominada *coeficiente de determinação*, que constitui-se em uma medida do grau de relação entre as duas variáveis. Quanto maior o *coeficiente de determinação*, tanto melhor a equação de *regressão* reproduz os valores experimentais. O *coeficiente de determinação* correspondente à tabela 2 é $0,9978$.

primeiras funções ajustadas são indiscerníveis neste gráfico (a linha menos sinuosa constitui-se no gráfico de ambas as funções). As outras duas funções aproximam-se ainda mais dos pontos experimentais do que as duas primeiras (isto é possível de ser reconhecido na Fig. 2), sendo *os somatórios dos quadrados dos resíduos* inferiores aos apresentados nas tabelas 1 e 2 e valendo respectivamente $0,0078 \text{ s}^2$ e $0,0056 \text{ s}^2$.

Desta forma, temos quatro funções que aderem muito bem aos pontos experimentais. As duas primeiras funções, além de reproduzirem com grande aproximação os resultados experimentais, geram para todos os comprimentos do pêndulo entre 0 e 200 cm praticamente os mesmos períodos (tão semelhantes que na figura aparecem como uma única curva); entretanto, produzem resultados cada vez mais discrepantes conforme o comprimento aumenta. Ou seja, se dentro do intervalo abrangido pelos valores experimentais as duas primeiras equações são praticamente idênticas (apesar da segunda ser um pouco melhor do que a primeira pelo critério de qualidade do ajuste – isto é, pelo *somatório dos quadrados dos resíduos*), não o são quando as utilizarmos para grandes comprimentos. As duas últimas funções, apesar de aderirem melhor aos pontos experimentais, são menos *suaves* do que as anteriores; é facilmente observável na Fig. 2 que a derivada primeira de ambas é variável em sinal. Assim, as duas últimas funções não são *monotônicas*.

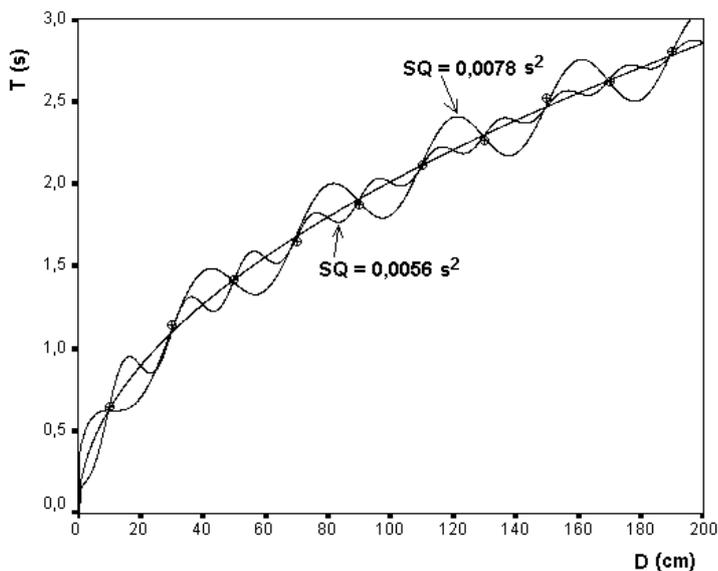


Fig. 2 - Gráfico de quatro equações de regressão que relacionam o período do pêndulo (T) com o seu comprimento (D).

Qual das funções deve ser escolhida como a "*Lei do Pêndulo Simples*"? (Por simplicidade estamos tratando de apenas quatro funções; conforme destacado anteriormente, há virtualmente infinitas funções candidatas à Lei.) A opção por qualquer uma das quatro funções dependerá de pressupostos que transcendem aos dados.

Será que há algum critério formal, matemático, independente da situação experimental, que permita decidir qual das funções é a lei? Vejamos alguns critérios formais propostos pelos indutivistas:

O *critério da qualidade do ajuste*: a equação escolhida é a que melhor se ajusta aos dados, isto é, a que determina a menor *soma dos quadrados dos resíduos*. Este critério levaria a escolhermos a última das quatro funções; entretanto tal critério é obviamente problemático, tendo em vista que podemos sempre encontrar outras funções que se ajustem tão bem ou melhor do que essas quatro; também sempre é possível se conseguir ajustes perfeitos, por exemplo, com polinômios de grau 9 ou maior. A função escolhida nunca deverá passar exatamente pelos pontos experimentais, se admitirmos que qualquer medida está sujeita a erros; entretanto existem virtualmente infinitas funções que se ajustam aos pontos experimentais com o mesmo grau de aproximação.

O *critério da suavidade da curva*: a função escolhida é aquela que determina uma curva suave (monotônica) entre os pontos experimentais. Com este critério descartam-se as duas últimas funções mas não há como decidir entre as duas primeiras⁸.

Alguns epistemólogos insistiram que a escolha devesse ser guiada pelo *critério da simplicidade*⁹; entretanto, como bem destaca Hempel (1981; p. 58 e 59):

Não é fácil formular critérios de simplicidade num sentido relevante que justifiquem essa preferência(...) Lógicos e filósofos ainda não conseguiram uma caracterização geral satisfatória da simplicidade(...) Outro problema intrincado atinente à simplicidade é o da sua justificação: que razões existem para seguir o chamado princípio da simplicidade (...)?

Se adotarmos como mais *simples* a função com menor número de parâmetros a serem determinados por *regressão*, não conseguiremos decidir entre as duas

⁸ Um interessante argumento contra a utilização deste critério pode ser encontrado em Watkins (1982). A essência do argumento está em mostrar que o comportamento de determinados sistemas físicos não é sempre *suave* entre os pontos observados experimentalmente; tal pode ocorrer por exemplo em *curvas de ressonância*.

⁹ Todos estes critérios são estritamente formais, matemáticos, independentes da situação experimental a qual se referem. Eles expressam a tentativa do empirista-indutivista de concretizar o ideal de "*descobrir a lei a partir dos resultados experimentais*".

primeiras pois ambas tiveram dois parâmetros calculados. Por outro lado, notemos que o expoente da primeira função pode assumir qualquer valor entre 0,48 e 0,52 (não necessariamente 0,5); já os expoentes da segunda função são exatamente 0,4 e 0,6. Qual das duas é a mais *simples*?

A conclusão é que apenas os resultados experimentais, combinados com a matemática e alguns critérios formais, não são suficientes para produzir conhecimento científico.

V. A teoria guia a escolha da função a ser ajustada aos resultados experimentais

Quando Bernard e Epp propuseram uma lei de potência, implicitamente decidiram que o período do pêndulo tende para zero quando o seu comprimento (distância entre o ponto de suspensão e o centro da esfera) tende para zero. Todas as quatro funções ajustadas levam a um período nulo quando o comprimento tende para zero. Estará esta suposição correta?

É fácil de se constatar que não pois, se suspendermos um corpo por seu centro de gravidade, ele não oscila, já que se encontra em equilíbrio indiferente. Assim sendo, o período não pode tender para zero quando o comprimento tende para zero; ou seja, o período deve crescer quando o comprimento tender para zero (deve tender a infinito quando o comprimento tende para zero). É importante destacar que estamos introduzindo uma consideração teórica, independente do experimento realizado; tal consideração nos encaminha pela escolha de outras funções, muito diferentes das quatro anteriores.

A Mecânica Newtoniana, combinada com um modelo para o pêndulo, permite prever como o período varia com a distância entre o ponto de suspensão e o centro de gravidade do pêndulo (note-se que qualquer pêndulo real não é um pêndulo simples; como, então, se pode "*descobrir experimentalmente a Lei do Pêndulo Simples*"?). Um modelo que podemos assumir para o nosso experimento é o de uma esfera suspensa em um fio inextensível e sem massa, oscilando sem amortecimento, com pequena amplitude. Então é possível se demonstrar (Silveira, 1992) que o período será dado pela seguinte função:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{D + \frac{2R^2}{5D}}{g}} \quad (1)$$

onde R é o raio da esfera, D a distância entre o centro de gravidade e o ponto de suspensão e g é a aceleração gravitacional.

Notamos que a equação (1) contempla a consideração anterior de que o período tende para infinito quando o comprimento tende para zero. Para a esfera utilizada (cerca de 3cm de raio), o período será dado por:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{D + \frac{2.3^2}{5D}}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{D + \frac{3,6}{D}}{g}} \quad (2)$$

Finalmente ajustamos uma equação como a (2) aos nossos resultados experimentais, deixando a aceleração gravitacional como parâmetro a ser calculado por *regressão*. A tabela 4 apresenta, além dos valores obtidos experimentalmente, os valores calculados pela equação de *regressão* e o *somatório dos quadrados dos resíduos* (SQ).

Tabela 4 - Resultados experimentais, valores calculados pela equação de regressão

$\hat{T} = 2\pi \sqrt{\frac{D + \frac{3,6}{D}}{974}}$ e somatório dos quadrados dos resíduos.

D (cm)	T (s)	\hat{T} (s)		D (cm)	T (s)	\hat{T} (s)
10	0,65	0,648		110	2,11	2,112
30	1,14	1,105		130	2,26	2,296
50	1,42	1,425		150	2,52	2,466
70	1,65	1,685		170	2,62	2,625
90	1,87	1,910		190	2,80	2,775
				$SQ = \sum [T - \hat{T}]^2 = 0,0089 \text{ s}^2$		

O único parâmetro determinado por *regressão* foi a aceleração gravitacional, resultando em 974 cm/s^2 . O erro deste parâmetro é de 10 cm/s^2 . Desta forma, podemos concluir que o valor verdadeiro da aceleração gravitacional situa-se, com confiança de 95%, dentro do intervalo que vai de aproximadamente 954 cm/s^2 a 994 cm/s^2 . Nota-se que a qualidade do ajuste para esta equação é muito semelhante às duas primeiras funções ajustadas. A nossa opção por esta equação não se deve a nenhum dos critérios formais discutidos na seção anterior; ela é devida a pressupostos teóricos sobre o sistema físico em questão.

Finalmente a Fig. 3 apresenta o gráfico da função ajustada, bem como os pontos experimentais.

VI. Conclusão

Neste artigo destacamos que, apesar da concepção empirista ter sido duramente criticada por filósofos, historiadores da ciência e cientistas, ainda perdura no ensino de Ciências e de Física. A seguir, como uma das estratégias de abalar tal concepção, demonstramos a insustentabilidade da proposta indutivista de "*descobrir a lei a partir de resultados experimentais*". Em poucas palavras, o fracasso de tal proposta se deve a que um mesmo conjunto de pontos é compatível com um número infinito de funções.

Destacamos também que a decisão por uma função de ajustamento transcende os resultados experimentais, envolvendo considerações teóricas. Tudo isto não tem nada de novo pois os epistemólogos a muito tempo vem insistindo que "*todo o nosso conhecimento é impregnado de teoria, inclusive nossas observações*" (Popper, 1975, p. 75).

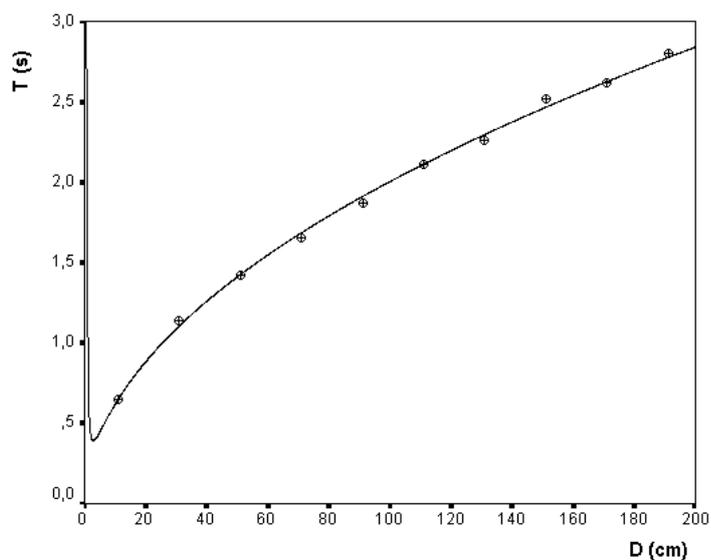


Fig. 3: Gráfico da equação de regressão $\hat{T} = 2\pi \sqrt{\frac{D + \frac{3,6}{974}}{974}}$ e dos valores experimentais.

Em cursos de história e epistemologia da Física temos implementado tal tipo de argumentação com o objetivo de mostrar que o programa empirista-indutivista é, segundo Lakatos (1987, 1989), *regressivo e degenerou*.

VII. Bibliografia

ABBEL, S.K., SMITH, D.C. What is science? Preservice elementary teacher's conceptions of nature of science. *International Journal of Science Education*, 16(4), p. 475-487, 1994.

ABD-EL-KHALICK, F., BELL, R.L., LERDERMANN, N.G. The nature of science and instructional practice: making the unnatural natural. *Science Education*, 82(4), p. 417-436, 1998.

AMALDI, U. *Imagens da Física – as idéias e as experiências do pêndulo aos quarks*. São Paulo: Scipione, 1995.

BACON, F. *Bacon – Os pensadores*. São Paulo: Abril Cultural, 1984.

BARROS, C., PAULINO, W.R. *Os seres vivos*. São Paulo: Ática, 53^a ed., 1999.

BERNARD, C. H. e EPP, C. D. *Laboratory experiments in college physics*. New York: John Willey, 1995.

BUNGE, M. *Filosofia da Física*. Lisboa: Edições 70, 1973.

CARVALHO, A.M.P. de, GIL, D. *Formação de professores de ciências: tendências e inovações*. São Paulo: Cortez, 1998.

CHALMERS, A F. *Qué es esa cosa llamada ciencia?* Madrid: Siglo Veintiuno, 1987.

CHOMSKI, N., FODOR, J. Exposição do paradoxo. In: PIATELLI-PALMARINI, M. (org.) *Teorias da linguagem, teorias da aprendizagem*. Lisboa: Ed. 70, 1987.

DUSCHL, R.A. Science Education and Philosophy of Science, twenty-five years of mutually exclusive development. *School Science and Mathematics*, 87(7), p. 541-555, 1985.

EINSTEIN, A. *Notas autobiográficas*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1982.

FEYERABEND, P. *Contra o método*. Lisboa: Relógio D' Água, 1993.

- FURIÓ, C.J.M. Tendências actuales en la formación del profesorado de ciências. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(2), p. 188-199, 1994.
- GIL, D. Contribución de la historia y de la filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación. *Enseñanza de las Ciencias*, 11(2), p. 197-212, 1993.
- GIL, D., CARRASCOSA, J., FURIÓ, C., TORREGROSA, J.M. *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*. Barcelona: Horsori, 1991.
- GOODMAN, N. Ciência e simplicidade. In: MORGENBESSER, S. *Filosofia da ciência*. São Paulo: Cultrix, 1978.
- GUSTAFSON, B.J., ROWELL, P.M. Elementary preservice teachers: constructing conceptions about learning science, teaching science and the nature of science. *International Journal of Science Education*, 17(5), p. 589-605, 1995.
- HANSON, N. R. Observação e interpretação. In: MORGENBESSER, S. *Filosofia da ciência*. São Paulo: Cultrix, 1978.
- HARRES, J.B.S. *Concepções de professores sobre a natureza da ciência*. Tese de Doutorado em Educação. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1999.
- HEMPEL, C. G. *Filosofia da ciência natural*. Rio de Janeiro: Zahar, 1981.
- HUME, D. *Investigação sobre o entendimento humano*. Lisboa: Ed. 70, 1985.
- KOULAUDIS, V., OGBORN, J. Science teachers philosophical assumptions: how we do we understand them? *International Journal of Science Education*, 17(3), p.273-283, 1995.
- KOYRÉ, A. *Estudos Galilaicos*. Lisboa: Dom Quixote, 1986.
- KRASILCHIK, M. The “scientists”: a Brazilian experiment in science education. *International Journal of Science Education*, 12(3), p.282-287, 1990.
- KUHN, T. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Perspectiva, 1978.
- LAKATOS, I. Cambios en el problema de la lógica indutiva. In: LAKATOS, I. *Matemáticas, creencia y epistemología*. Madrid: Alianza, 1987.

LAKATOS, I. *La metodología de los programas de investigación científica*. Madrid: Alianza, 1989.

LAUDAN, L. *Progress and its problems*. Berkeley: University of California Press, 1977.

MANDEL, J. *The statistical analysis of experimental data*. New York, Dover, 1984.

MATTHEWS, M. History, philosophy and science teaching: what can be done in an undergraduate course? *Studies in Philosophy and Education*, 10(1), p. 93-98, 1990.

MATTHEWS, M. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 12(3), p. 164-214, 1995.

MOREIRA, M.A., OSTERMANN, F. Sobre o ensino do método científico. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 10(2), p. 108-117, 1993.

NÍAZ, M. Mas allá del positivismo: una interpretación lakatosiana de la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(1), p. 97-100, 1994.

OLIVA, A. (org.) *Epistemologia: a cientificidade em questão*. Campinas: Papirus, 1990.

OSTERMANN, F. A epistemologia de Kuhn. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 13(3), p. 184-196, 1996.

PAIS, A. *"Sutil é o Senhor ...": a ciência e a vida de Albert Einstein*. Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1995.

PIAGET, J., GARCIA, R. *Psychogenesis and History*. New York: Columbia University Press, 1989.

POPPER, K.R. *Conhecimento objetivo*. São Paulo: EDUSP, 1975.

POPPER, K.R.. *Conjecturas e refutações*. Brasília: UNB, 1982.

POPPER, K.R. *Lógica da pesquisa científica*. São Paulo: EDUSP, 1985.

PORLÁN, R., RIVERO, A., MARTÍN DEL POZO, R. Conocimiento profesional y epistemología de los profesores I: teoría, métodos e instrumentos. *Enseñanza de las Ciencias*, 15(2), p. 155-173, 1997.

PORLÁN, R., RIVERO, A., MARTÍN DEL POZO, R. Conocimiento profesional y epistemología de los profesores II: estudios empíricos y conclusiones. *Enseñanza de las Ciencias*, 16(2), p. 271-289, 1998.

SILVEIRA, F. L. Considerações sobre o artigo "Métodos numéricos no ensino da Física Experimental". *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 9(1) p. 86 -93, abr. 1992.

SILVEIRA, F. L. A filosofia da ciência de Karl Popper: o racionalismo crítico. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 13 (3), p. 219-230, 1996a.

SILVEIRA, F. L. A metodologia dos programas de pesquisa: a epistemologia de Imre Lakatos. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 13 (3), p. 219-230, 1996b.

STEINBERG, M.S., BROWN, D.E., CLEMENT, J. Genius is not immune to persistent misconceptions: conceptual difficulties impending Issac Newton and contemporary physics students. *International Journal of Science Education*, 12(3), p.256-273, 1990.

TOULMIN, S. *Human Understanding*. Princeton: Princeton University Press, 1972.

WATKINS, J. (1982) El enfoque popperiano del conocimiento científico. In: RADNITSKI G., ANDERSSON, G. *Progreso y racionalidad en la ciencia*. Madrid: Alianza.