

Newton e os Problemas Inversos

A. K. T. Assis
Instituto de Física “Gleb Wataghin”
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
13083-859 Campinas, SP, Brasil
E-mail: assis@ifi.unicamp.br
Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

Resumo

Apresentamos uma tradução do artigo “Newton and Inverse Problems” (ASSIS, 2011), ampliada, atualizada e com novas referências. Utilizamos também aspectos importantes discutidos no artigo “Newton e Suas Grandes Obras: O *Principia* e o *Óptica*” (ASSIS, 1998). Consideramos a abordagem geral que Newton utilizava para tratar com os problemas científicos. Mostramos que ele sempre considerou os aspectos inversos de qualquer questão. Concluimos que essa maneira de lidar com a física, com a matemática e com a filosofia foi uma das fontes principais de sua imensa criatividade na ciência.

Introdução

Isaac Newton (1642-1727) é um dos maiores cientistas de todos os tempos. Seus dois livros mais importantes são o *Principia*, publicado originalmente em 1687, e o *Óptica*, publicado originalmente em 1704. As duas obras já se encontram totalmente traduzidas para o Português (NEWTON, 1990, 1996 e 2008), de onde tiramos as citações. Ele sempre viveu na Inglaterra, tendo entrado no Trinity College, em Cambridge, em 1661. Obteve o título de bacharel em 1665, tornando-se um Professor Lucasiano na Universidade de

Cambridge em 1669. Seu primeiro artigo científico, sobre óptica, foi publicado em 1672, e já se encontra traduzido para o Português (SILVA; MARTINS, 1996). No mesmo ano, foi eleito membro da Royal Society. Ingressou no parlamento inglês, em 1689, como deputado indicado pela Universidade de Cambridge. Em 1696, foi nomeado diretor da Casa da Moeda da Inglaterra. Tornou-se presidente da Royal Society em 1703, ocupando essa função até sua morte. Recebeu o título de Cavaleiro (*Sir*) em 1705. Faleceu aos 85 anos, sendo sepultado na Abadia de Westminster em Londres.

A obra mais importante de Newton tem como título *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, sendo, usualmente, conhecida por seu primeiro nome em latim, *Principia*. Ela foi escrita em latim e traduzida para o Inglês por Andrew Motte, havendo, atualmente, uma nova tradução inglesa feita por Cohen e Whitman (NEWTON, 1934 e 1999). Foram publicadas três edições em sua vida, a saber, em 1687, 1713 e 1726.

Já o *Óptica* foi publicado originalmente em Inglês, com quatro edições inglesas: 1704, 1717, 1721 e 1730. Esta última versão foi corrigida pelo próprio Newton, embora publicada após sua morte. As edições em latim foram publicadas em 1706 e 1719. Boa parte do *Óptica* já estava pronta nos primeiros anos da década de 1690, quando se perdeu por um incêndio. Logo, pode-se dizer que o *Principia* e o *Óptica* foram concebidos ao redor da mesma época, entre meados de 1680 e 1690.

Neste trabalho, consideramos sua maneira de pesquisar. Mostramos que ele sempre considerava os aspectos inversos de qualquer problema. Concluímos que essa maneira de lidar com a física e com a matemática foi uma das principais fontes de sua imensa criatividade.

Problemas Inversos na Matemática

Um período muito importante na vida de Newton foram os anos de 1664 a 1666, conhecidos como seus *anos milagrosos*, durante os quais obteve seus primeiros resultados importantes em matemática e na física. Nesse período, ele estava na propriedade rural da família em Woolsthorpe, onde havia nascido, sendo que a Universidade de Cambridge ficou fechada entre agosto de 1665 e abril de 1667 devido à peste que assolou a Inglaterra.

Podemos ter uma primeira ideia da sua maneira de raciocinar, lendo sua própria descrição desse período, que aparece em uma carta escrita ao final de sua vida (WESTFALL, 1995, p. 39):

No início do ano de 1665, descobri o método de aproximação a uma série desse tipo & a regra para reduzir qualquer potência de qualquer binômio a tal série. No mesmo ano, em maio, descobri o método das tangentes de Gregory & Slusius &, em novembro, obtive o método direto das fluxões, & no ano seguinte, em janeiro, a teoria das cores, & em maio seguinte desvendei o método inverso das fluxões. &, no mesmo ano, comecei a pensar na gravidade como se estendendo até a órbita da Lua & (depois de descobrir como calcular a força com que [um] globo girando dentro de uma esfera pressiona a superfície da esfera), a partir da regra de Kepler de que os períodos dos planetas estão numa proporção sesquiáltera com suas distâncias do centro de suas órbitas, deduzi que as forças que mantêm os planetas em suas órbitas devem [variar], reciprocamente, como o quadrado de sua distância do centro em torno do qual eles giram: & a partir disso, comparei a força necessária para manter a Lua em sua órbita com a força da gravidade na superfície da Terra, & descobri que elas se correspondem bem de perto. Tudo isso foi nos dois anos da peste, 1665-1666. Pois, nessa época, eu estava no auge de minha fase de invenção & me interessava mais pela matemática & pela filosofia do que em qualquer ocasião posterior.

Ou seja, ele encontrou os métodos direto e inverso das fluxões, que são a essência do nosso cálculo diferencial e integral. A partir do método das tangentes, ele podia calcular derivadas, assim como podia calcular áreas por quadraturas. Sua descoberta do teorema fundamental do cálculo ligando a integração como sendo o inverso da diferenciação também vem desses anos milagrosos (NEWTON, 1934, p. 123-128; WESTFALL, 1995, p. 40-46).

Problemas Inversos na Óptica

Newton, em seu livro *Óptica*, ofereceu vários exemplos de como ele lidava com problemas inversos na física (NEWTON, 1996). Esse trabalho é dividido em três livros. O livro I tem duas partes, tratando da decomposição da luz branca nas cores do espectro após atravessar um prisma. A primeira parte começa com oito definições (de raio de luz, refringência, reflexibilidade etc.), oito axiomas (o ângulo de reflexão com a normal é igual ao ângulo de incidência com a normal etc.), seis teoremas, dois problemas e dezesseis experiências. A segunda parte tem cinco teoremas, seis problemas e dezessete experiências. O livro II lida com as reflexões, refrações e cores de corpos transparentes finos e espessos (anéis de Newton). A primeira parte contém vinte e quatro observações. A segunda parte contém comentários sobre as observações precedentes. A terceira parte lida com as cores permanentes dos corpos naturais e suas analogias com as cores das lâminas transparentes finas, contendo vinte proposições. A quarta parte contém treze observações sobre as reflexões e cores das placas polidas transparentes espessas. A primeira parte do livro III contém onze observações sobre as inflexões (difrações) dos raios de luz e das cores produzidas dessa maneira. No final do livro, Newton incluiu trinta e uma questões, lidando com vários aspectos não apenas da óptica, mas também da mecânica, física e filosofia em geral.

Embora a estrutura do livro seja, de certa forma, similar à obra *Os Elementos de Geometria* de Euclides, as provas das proposições (também chamadas de teoremas por Newton) não são baseadas na lógica pura como um conjunto de construções e raciocínios feitos a partir dos axiomas. No *Óptica*, as demonstrações das proposições e dos teoremas são feitas, nas palavras de Newton, “por experiências”. Essa é uma característica notável introduzida por Newton para a prova de teoremas. Esse procedimento tem início já na primeira proposição do livro, teorema 1 (NEWTON, 1996, p. 50-51):

Proposição 1. Teorema 1: As luzes que diferem em cor diferem também em graus de refringência.

Demonstração por experiências.

Experiência 1: Tomei um pedaço retangular de cartão preto terminado por lados paralelos, e com uma linha reta perpendicular de um lado ao outro dividi-o em duas partes iguais passando uma reta perpendicular de um lado ao outro. Pinte uma das partes com uma cor vermelha e a outro com uma cor azul [...].

O mesmo procedimento de prova foi adotado em praticamente todos os teoremas. Já o assunto dos livros II e III do *Óptica* trata de observações sobre fenômenos novos, que não estão contidos nem foram deduzidos a partir dos axiomas iniciais descritos no livro I.

Vejamos, agora, como Newton lidou com os aspectos inversos dos problemas no campo da óptica. Após apresentar as definições e axiomas, ele introduziu uma série de proposições, teoremas e problemas. Entre outras coisas, ele separou a luz solar nas cores do espectro e depois combinou essas cores formando o branco. Por exemplo (NEWTON, 1996, p. 54-55):

Proposição 2. Teorema 2: A luz do sol consiste em raios que se refratam diferentemente.

Demonstração por experiências.

Experiência 3: Numa sala bem escura coloquei em um orifício circular de 1/3 de polegada de diâmetro que fiz na folha da janela um prisma de vidro por onde o feixe de luz solar que entrasse pelo orifício pudesse ser refratado para cima em direção à parede oposta da sala, formando ali uma imagem colorida do sol [...].

Sua quarta proposição (também chamada de primeiro problema) da primeira parte do livro I diz o seguinte (NEWTON, 1996, p. 76): “Separar um do outro os raios heterogêneos da luz composta”. Para realizar esse procedimento, ele deixou a luz do Sol penetrar em seu quarto escuro através de um pequeno orifício feito na folha da janela. Colocou uma lente aproximadamente a onze pés da janela e depois dela havia um prisma que separava a luz do Sol nas cores do espectro sobre um papel branco.

Já na quinta proposição (também chamada de teorema 4) da segunda parte do livro I, ele explorou o efeito oposto (NEWTON, 1996, p. 121):

Proposição 5. Teorema 4: A brancura e todos os tons cinzentos entre o branco e o preto podem ser compostos de cores, e a brancura da luz do sol é composta de todas as cores primárias mescladas numa proporção devida.

Prova por Experiências.

Experiência 9 [...].

A demonstração desse teorema é feita através de seis experiências bem detalhadas.

Sua décima primeira proposição tinha o mesmo objetivo (NEWTON, 1996, p. 150):

Proposição 11. Problema 6: Misturando luzes coloridas, compor um feixe de luz da mesma cor e natureza de um feixe da luz direta do sol, verificando assim a verdade das Proposições precedentes.

Um outro exemplo dessa maneira de pesquisar os fenômenos até chegar a suas essências foi apresentado por Newton ao comparar a influência dos corpos sobre a luz e da luz sobre os corpos. Por exemplo, na quinta questão ao final do *Óptica*, vemos, mais uma vez, Newton considerando os dois lados de um mesmo problema (NEWTON, 1996, p. 251):

Questão 5: Os corpos e a luz não agem mutuamente um sobre o outro, quer dizer, os corpos sobre a luz ao emití-la, refletí-la, refratá-la e inflectí-la [difratá-la], e a luz sobre os corpos ao aquecê-los e ao imprimir em suas partes um movimento vibratório no qual consiste o calor?

Essa conclusão tem uma certa analogia com sua lei da gravitação universal, já que se a Terra atrai a maçã e o Sol atrai os planetas, então a maçã também deve atuar sobre a Terra assim como os planetas devem atuar sobre o Sol. Ou seja, os corpos atuam sobre a luz, por exemplo, refletindo-a e refratando-a. Mas, ao mesmo tempo, a luz atua sobre os corpos, aquecendo-os. Hoje em dia, poderíamos citar outros exemplos dessa influência, como a ionização

de átomos pela luz, a transferência de momento linear da luz para a matéria na reflexão ou na absorção etc. Mais uma vez, vemos Newton explorando os dois lados do fenômeno, não apenas a influência da matéria sobre a luz, mas também o mecanismo inverso. Podemos encarar esse exemplo como mais um exemplo de ação e reação, agora entre entidades aparentemente distintas, como os corpos materiais e a luz.

As últimas Questões do Óptica, de números 30 e 31, apresentam outros exemplos dessa maneira Newtoniana de raciocinar, sempre considerando os lados opostos de todos os problemas (NEWTON, 1996, p. 273-293):

Questão 30: Não são os corpos pesados e a luz convertíveis um no outro, e não podem os corpos dever grande parte de sua atividade às partículas de luz que entram em sua composição? Pois todos os corpos fixos, uma vez aquecidos, emitem luz enquanto continuam suficientemente quentes, e a luz, reciprocamente, se detém nos corpos sempre que seus raios colidem com suas partes, como mostramos acima. Não conheço nenhum corpo menos apto a brilhar do que a água; e, todavia, a água, por destilações frequentes, transforma-se em terra fixa, como verificou o Sr. Boyle, e, tornando-se essa terra, então, capaz de suportar um calor suficiente, ela brilha como os outros corpos em virtude do calor.

A transformação dos corpos em luz, e da luz em corpos, é muito conforme ao curso da natureza, que parece deliciar-se com as transmutações. [...]

Questão 31: Não têm as pequenas partículas dos corpos certos poderes, virtudes ou forças por meio dos quais elas agem a distância não apenas sobre os raios de luz, refletindo-os, refratando-os e inflectindo-os [difratando-os], mas também umas sobre as outras, produzindo grande parte dos fenômenos da natureza? Pois sabe-se que os corpos agem uns sobre os outros pelas ações da gravidade, do magnetismo e da eletricidade; e esses exemplos mostram o teor e o curso da natureza, e não tornam improvável que possa haver mais poderes atrativos além desses. Porque a natureza é muito consonante e conforme a si mesma. [...] As atrações da gravidade, do magnetismo e da eletricidade alcançam distâncias

bem perceptíveis, e assim têm sido observadas pelos olhos comuns, podendo haver outras que alcançam distâncias tão pequenas que escaparam à observação até aqui; e talvez a atração elétrica possa alcançar essas distâncias mínimas mesmo sem ser excitada pela fricção.

[...]

E assim a natureza será muito conforme a si mesma e muito simples, executando todos os grandes movimentos dos corpos celestes pela atração da gravidade que atua sobre esses corpos, e quase todos os pequenos movimentos de suas partículas por alguns outros poderes atrativos e repulsivos que atuam sobre as partículas. [...]

Problemas Inversos na Mecânica

Consideramos agora a obra prima de Newton, o *Principia* (NEWTON, 1990 e 2008). Ela começa com oito definições (quantidade de matéria etc.), um Escólio sobre o movimento absoluto e relativo, apresentando sua famosa experiência do balde, vindo então suas três leis do movimento (que ele também denominou de axiomas), depois seis corolários, seguidos por um outro Escólio no qual discutiu as leis de colisão etc. O restante da obra é dividido em três livros. O livro I lida com o movimento dos corpos, contendo noventa e oito proposições (50 teoremas e 48 problemas). O livro II trata do movimento dos corpos em meios com resistência, contendo cinquenta e três proposições (41 teoremas e 12 problemas). O livro III lida com o sistema do mundo com um tratamento matemático. Ele começa com quatro regras de raciocínio em filosofia, seguido por seis fenômenos celestes (os planetas descrevem áreas proporcionais aos tempos de percurso etc.). Seguem-se, então, quarenta e duas proposições (20 teoremas e 22 problemas). No final do livro, há um famoso Escólio Geral.

Em várias partes dessa obra, podemos observar Newton lidando com aspectos opostos de qualquer problema mecânico. Isso já fica evidente, por

exemplo, em seu terceiro axioma ou lei do movimento (NEWTON, 1990, p.16):

Lei III: A toda ação há sempre oposta uma reação igual, ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.

Seja o que for que puxe ou empurre alguma coisa, é da mesma forma, puxado ou empurrado por ela. Se você empurra uma pedra com seu dedo, o dedo é também empurrado pela pedra. Se um cavalo puxa uma pedra amarrada a uma corda, o cavalo (se posso dizer assim) vai ser igualmente puxado de volta na direção da pedra, pois a corda distendida, pela mesma tendência a relaxar ou distorcer-se, puxará o cavalo na direção da pedra, tanto quanto ela puxa a pedra na direção do cavalo, e obstruirá o progresso de um tanto quanto promove o do outro. Se um corpo choca-se com outro, e pela sua força muda o movimento desse, aquele corpo também (por causa da igualdade da pressão mútua) sofrerá uma mudança igual no seu próprio movimento, em direção à parte contrária. As mudanças feitas por essas ações são iguais não nas velocidades mas nos movimentos dos corpos, quer dizer, se os corpos não são obstruídos por qualquer outros impedimentos. Pois, porque os movimentos são igualmente alterados, as mudanças de velocidades feitas em direções a partes contrárias são inversamente proporcionais aos corpos. Essa lei também ocorre em atrações, como será provado no próximo Escólio.

Após as três leis do movimento, aparecem seis corolários. Segue-se, então, um Escólio no qual Newton demonstra, por experiências feitas com pêndulos, a validade da lei de ação e reação nas colisões. Ele também apresentou experiências mostrando que essa lei é obedecida para atrações magnéticas atuando à distância, sem contato entre os corpos que estavam interagindo (NEWTON, 1990, p. 28):

Fiz a experiência com magnetita e ferro. Se esses, colocados separadamente em recipientes adequados, flutuam, um próximo ao outro, em água parada, nenhum deles propelerá o outro; mas, por

serem igualmente atraídos, sustentarão a pressão um do outro, e finalmente repousarão em equilíbrio.

No livro III do *Principia*, Newton apresentou seis fenômenos relacionados com as leis de Kepler dos movimentos dos corpos celestes (NEWTON, 2008, p.189-192):

Fenômeno I: Que os planetas que circundam Júpiter, por raios traçados ao centro de Júpiter, descrevem áreas proporcionais aos tempos de percurso, e que seus tempos periódicos, estando as estrelas fixas em repouso, estão como a $3/2^a$ potência de suas distâncias deste centro.

[...]

Fenômeno IV: Que estando as estrelas fixas em repouso, os tempos periódicos dos cinco planetas primários e (seja do sol ao redor da terra, ou da terra ao redor do sol, são como a $3/2^a$ potência de suas distâncias médias ao sol.

A partir desses fenômenos, ele deduziu que a força da gravidade é inversamente proporcional ao quadrado das distâncias (NEWTON, 2008, p. 195):

Proposição I. Teorema 1: Que as forças com que os planetas que circundam Júpiter são continuamente desviados dos movimentos retilíneos e mantidos em suas próprias órbitas tendem ao centro de Júpiter e são inversamente proporcionais aos quadrados das distâncias dos lugares destes planetas em relação a este centro.

[...]

Proposição II. Teorema II: Que as forças com que os planetas primários são continuamente desviados dos movimentos retilíneos e mantidos em suas próprias órbitas tendem ao sol e são inversamente proporcionais aos quadrados das distâncias dos lugares destes planetas ao centro do sol.

Após chegar a esses resultados, Newton começou o processo inverso. Isto é, começando com uma força gravitacional variando com o inverso do quadrado da distância entre os corpos, proporcional a $1/r^2$, ele deduziu as leis de Kepler. Um exemplo (NEWTON, 2008, p. 210):

Proposição XIII. Teorema XIII: Os planetas movem-se em elipses que têm seu foco comum no centro do sol e, a partir de raios traçados até este centro, descrevem áreas proporcionais aos tempos de percurso.

Dissertamos acima sobre estes movimentos a partir dos Fenômenos. Agora que conhecemos os princípios dos quais eles dependem, a partir destes princípios deduzimos os movimentos dos céus *a priori*. [...]

Ou seja, Newton partiu das leis de Kepler para então deduzir sua lei da gravitação universal. Em seguida, partiu de sua lei da gravitação universal para deduzir as leis de Kepler. Mas Newton não parou aqui. Em seguida, ele deduziu um conjunto de novos resultados, começando com uma força da gravidade proporcional ao produto das massas que estão interagindo e variando com o inverso do quadrado da distância entre elas. Como um exemplo, temos sua Proposição XIX, Problema III (NEWTON, 2008, p. 214): “*Achar a proporção do eixo de um planeta para os diâmetros perpendiculares a ele*”. Isto é, ele calculou o achatamento dos planetas ao redor de seus polos devido às suas rotações ao redor desses eixos em relação ao pano de fundo das estrelas fixas. Ele também deduziu, a partir de sua lei da gravitação universal, o movimento da Lua ao redor da Terra. A partir da Proposição XXIV, Teorema XIX, ele apresentou um novo conjunto de fenômenos que podiam ser explicados com base em sua lei da gravidade, a saber (NEWTON, 2008, p. 224): “*Que o fluxo e refluxo do mar surge das ações do sol e da lua*”. Isto é, conseguiu explicar as marés terrestres devido à influência gravitacional da Lua e do Sol sobre as águas dos mares. Outro resultado novo que conseguiu explicar, a partir de sua força gravitacional, aparece na Proposição XXXIX, Problema XX (NEWTON, 2008, p. 274): “*Descobrir a precessão dos equinócios*”. Nas próximas proposições, deduziu o movimento dos cometas ao redor do Sol.

Essencialmente, Newton começou com as leis de Kepler do movimento planetário e com sua expressão da aceleração centrípeta. Deduziu, então, sua lei da gravitação universal. Em seguida, partiu dessa lei da gravidade para deduzir não apenas as leis de Kepler, mas toda uma gama de novos fenômenos que nunca haviam sido explicados gravitacionalmente, a saber, o achatamento dos planetas nos polos devido as suas rotações ao redor desses eixos em relação ao pano de fundo das estrelas fixas, a precessão dos equinócios, as marés terrestres, as órbitas dos cometas etc.

Problemas Inversos na Filosofia

Na última Questão do Óptica, Newton apresentou sua visão geral de como se deve proceder na filosofia natural (NEWTON, 1996, p. 292-293):

Como na matemática, também na filosofia natural a investigação das coisas difíceis pelo método da análise deve sempre preceder o método da composição. Essa análise consiste em fazer experiências e observações, em tirar conclusões gerais delas por indução e em não admitir objeções contra as conclusões exceto aquelas que decorrem das experiências ou de algumas outras verdades. Pois as hipóteses não devem ser consideradas na filosofia experimental. E, embora a argumentação pela indução a partir de experiências e observações não seja a demonstração de conclusões gerais, ainda assim é o melhor caminho de argumentação que a natureza das coisas admite, e pode ser considerada tanto mais forte quanto mais geral é a indução. E se não aparece nenhuma exceção dos fenômenos, a conclusão pode ser afirmada em termos gerais. Mas se depois, em qualquer época, aparecer qualquer exceção relativamente às experiências, ela poderá então começar a ser afirmada com as exceções que aparecerem. Por esse método de análise podemos passar dos compostos aos ingredientes, e dos movimentos às forças que os produzem; e, em geral, dos efeitos às suas causas, e das causas particulares às causas mais gerais, até que o argumento termine na causa mais geral. Tal é o método da análise; e a síntese consiste em admitir as causas descobertas e estabelecidas como princípios, em explicar por elas os fenômenos que deles procedem e em provar as explicações. Nos dois primeiros livros desta Óptica

procedi a essa análise para descobrir e provar as diferenças originais dos raios de luz com respeito à refringência, à reflexibilidade e à cor, aos seus estados alternados de fácil reflexão e fácil transmissão e às propriedades dos corpos, tanto opacos quanto transparentes, das quais dependem suas reflexões e cores. E, uma vez provadas essas descobertas, elas podem ser admitidas no método da composição para explicar os fenômenos que delas resultam, e dei um exemplo desse método no final do primeiro livro. [...]

Newton formalizou sua maneira geral de lidar com a ciência no Prefácio da primeira edição do *Principia* (NEWTON, 1990, p. I-II):

[...] ofereço este trabalho como os princípios matemáticos da filosofia, pois toda a essência da filosofia parece consistir nisso – a partir dos fenômenos de movimento, investigar as forças da natureza e, então, dessas forças demonstrar os outros fenômenos; e para esse fim dirigem-se as proposições gerais no primeiro e segundo Livros. No terceiro Livro, dou um exemplo disso na explicação do Sistema do Mundo; pois, pelas proposições matematicamente demonstradas nos Livros anteriores, no terceiro derivo dos fenômenos celestes as forças de gravidade com as quais corpos tendem para o Sol e para os vários planetas. Então, dessas forças, por outras proposições que também são matemáticas, deduzo os movimentos dos planetas, dos cometas, da Lua e do mar. Gostaria que pudéssemos derivar o resto dos fenômenos da Natureza dos princípios mecânicos pelo mesmo tipo de raciocínio, pois, por muitas razões, sou induzido a suspeitar de que todos eles possam depender de certas forças pelas quais as partículas dos corpos, por algumas causas até aqui desconhecidas, ou são mutuamente impelidas umas em direção às outras e se ligam em formas regulares, ou são repelidas e se afastam umas das outras. Sendo desconhecidas essas forças, os filósofos até agora têm tentado em vão a investigação da Natureza; mas espero que os princípios aqui expostos tragam alguma luz, seja a esse ou a algum outro método mais verdadeiro de filosofar.

No início do livro III do *Principia*, ele apresentou um enfoque similar, a saber (NEWTON, 2008, p. 183):

Nos livros precedentes estabeleci os princípios de filosofia, não princípios filosóficos, mas matemáticos, isto é, tais que possamos basear nossos raciocínios em investigações filosóficas. Estes princípios são as leis e condições de certos movimentos, e poderes ou forças, que dizem respeito principalmente à filosofia. Para evitar que parecessem secos e estéreis, illustrei-os aqui e ali com alguns escólios filosóficos, explicando coisas que são de uma natureza mais geral e sobre as quais parece apoiar-se principalmente a filosofia, como a densidade e resistência dos corpos, espaços vazios de todos os corpos, e o movimento da luz e dos sons. Falta demonstrar a partir dos mesmos princípios a estrutura do Sistema do Mundo. [...]

No Escólio Geral, ao fim do *Principia*, afirmou o seguinte (NEWTON, 2008, p. 331-332):

E agora poderíamos acrescentar alguma coisa concernente a um certo espírito muito sutil que penetra e fica escondido em todos os corpos grandes, por cuja força e ação as partículas dos corpos atraem-se umas às outras quando se encontram a distâncias próximas e se unem se estão contíguas; e os corpos elétricos operam a distâncias maiores, tanto repelindo quanto atraindo os corpúsculos vizinhos; e a luz é emitida, refletida, refratada, inpletida [difratada] e aquece os corpos; e toda sensação é excitada e os membros dos corpos animais movem-se ao comando da vontade, propagada pelas vibrações deste espírito ao longo dos filamentos sólidos dos nervos, a partir dos órgãos sensoriais externos até o cérebro e do cérebro aos músculos. Mas estas são coisas que não podem ser explicadas em poucas palavras. Também não dispomos de uma quantidade suficiente de experiências que é necessário para determinar com precisão e demonstrar mediante que leis opera este espírito elétrico e elástico.

A explicação do Sistema do Mundo a partir da lei gravitacional de Newton é o coroamento do *Principia*.

Conclusão

Mostramos, neste trabalho, como Newton sempre considerou os aspectos inversos em todos os ramos do conhecimento, incluindo matemática, mecânica, óptica e filosofia. Essa característica de sua maneira de raciocinar e de considerar os diferentes problemas foi uma das principais fontes de sua criatividade poderosa na ciência.

Agradecimentos: O autor agradece ao Centro de Ciências da Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, pelo convite para participar da 4ª Jornada de Divulgação Científica ocorrida em novembro de 2015.

Bibliografia

Os artigos de A. K. T. Assis encontram-se disponíveis em <www.ifi.unicamp.br/~assis>.

ASSIS, A. K. T. Newton e suas grandes obras: o *Principia* e o *Óptica*. In: ALMEIDA, M. J. P. M. de; SILVA, H. C. da (editores). *Linguagens, Leituras e Ensino da Ciência*. Campinas: Mercado das Letras/Associação de Leitura do Brasil, 1998, p. 37-52.

ASSIS, A. K. T. Newton and inverse problems. In: KRAUSE, D.; VIDEIRA, A. (editores). *Brazilian Studies in Philosophy and History of Science: An Account of Recent Works*, volume 290 de *Boston Studies in the Philosophy of Science*, capítulo 3, p. 71-76 (Springer, Dordrecht, 2011). DOI: 10.1007/978-90-481-9422-3_3, 2011.

NEWTON, I. *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Berkeley: University of California Press, Edição Cajori, 1934.

NEWTON, I. *Principia* – Princípios Matemáticos de Filosofia Natural. Livro I: O Movimento dos Corpos. Tradução de RICCI, T.; BRUNET, L. G.; GEHRING, S. T.; CÉLIA, M. H. C. São Paulo: Nova Stella/Edusp, 1990.

NEWTON, I. *Óptica*. Tradução, introdução e notas de ASSIS, A. K. T. São Paulo: Edusp, 1996.

NEWTON, I. *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Nova tradução de COHEN, I. B.; WHITMAN, A. Berkeley: University of California Press, 1999.

NEWTON, I. *Principia* – Princípios Matemáticos de Filosofia Natural. Livro II: O Movimento dos Corpos (em Meios com Resistência). Livro III: O Sistema do Mundo (Tratado Matematicamente). Tradução de ASSIS, A. K. T. São Paulo: Edusp, 2008.

SILVA, C. C.; MARTINS, R. d. A. A “Nova teoria sobre luz e cores” de Isaac Newton: uma tradução comentada. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol. 18, p. 313-327, 1996.

WESTFALL, R. S. *A Vida de Isaac Newton*. Tradução de Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.