

CBPF - CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS
Rio de Janeiro

Ciência e Sociedade

CBPF-CS-002/14

fevereiro 2014

A Mecânica e as Técnicas

As Equações de Movimento e o Desenvolvimento das Ciências Naturais e da Tecnologia

Luiz A.C. Malbouisson & Ademir E. Santana

Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



A Mecânica e as Técnicas

As Equações de Movimento e o Desenvolvimento das Ciências Naturais e da Tecnologia

Mechanics and Technics: The equations of Motion and the Development of Natural Sciences and Technology

Luiz A.C. Malbouisson*

*Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia,
40210-340, Salvador, BA*

Ademir E. Santana†

*Centro Internacional de Física da Matéria Condensada,
Instituto de Física, Universidade de Brasília,
70910-900, Brasília, DF*

Analizamos a importância da ciência da mecânica para o desenvolvimento das técnicas e das ciências naturais, com o pressuposto de que todos os fenômenos naturais são manifestações do movimento, que é descrito por relações causais (equações de movimento) envolvendo diferentes configurações do estado mecânico de sistemas mecânicos. Como elemento metodológico de análise, discutimos alguns problemas abordados pela via mecânica e fazemos um estudo dos fundamentos metodológicos das mecânicas clássica e quântica. Em alguns casos, como a descoberta de Netuno e a redução do fenômeno da mutação genética a um problema mecânico, detalhamos a análise a partir dos textos originais; um procedimento que se mostra revelador às conclusões deste ensaio. Por exemplo, estimamos o impacto estratégico da mecânica sobre o desenvolvimento das técnicas e as implicações na formulação das ciências fenomenológicas.

Palavras-chave: bases da mecânica; desenvolvimento das técnicas; mecânica clássica; mecânica quântica

We analyze the importance of the Mechanics Science for the development of technics and the natural science, considering that all natural phenomena are manifestation of the motion, which is described by causal laws (equations of motions) among different configurations of the state of mechanical systems. As a methodological element for the analysis, we discuss some problems described by the mechanical way and carry out a study about the methodological foundations of classical and quantum mechanics. In some cases, as the discovery of Neptune and the reduction of the genetics mutation to a mechanical problem, we detail the analysis from the original works; a procedure that reveals basic achievements in this essay. For instance, we estimate the strategic impact of Mechanics on the development of the technics and the implications for the phenomenological formulations of sciences.

Keywords: bases of mechanics; developments of technics; classical mechanics; quantum mechanics

1. INTRODUÇÃO

Atribui-se aos gregos em Mileto na Jônia, no Sec. VI AC, a introdução de uma forma de geração de conhecimento, que se constituiu na chamada Razão Grega [1]. Esta tinha por base um procedimento de reflexão para com os fenômenos, em particular os naturais, tomando-os como objeto de uma investigação sistemática, e dos quais era apresentada uma

*Electronic address: lmalboui@ufba.br

†Electronic address: asantana@unb.br

descrição de conjunto. Com esta abordagem, os “físicos” milésios buscaram explicações acerca da constituição e existência do mundo. Tal concepção tanto se estabeleceu, que se credita a Tales a predição de um eclipse com base em dados da astronomia babilônica [1]. Estava aberto um caminho para as ciências naturais, e a história das sociedades ocidentais, com destaque ao período moderno, ficou marcada pelo desenvolvimento das técnicas, a partir da síntese grega de descrição dos processos naturais.

Este tipo de análise encontra um ápice na Renascença, e em especial com Isaac Newton. No mundo pós-Newtoniano tal abordagem possui uma forma compacta, básica para o entendimento e procedimento sistemático de interferência e manipulação de fenômenos da natureza, as chamadas equações de movimento. É a partir de então que com estas equações diversos tipos de movimentos ou sistemas mecânicos, difíceis de serem engendrados pela intuição ou em bases puramente empíricas, foram estabelecidos. Isto deu origem a profundas transformações nas técnicas levando ao estabelecimento de uma nova fisiologia, da biofísica clássica, da medicina e das engenharias do período moderno, além de novas técnicas associadas às máquinas de guerra. No século XX, com o aparecimento das equações de movimento da mecânica clássica relativística e da mecânica quântica, equações estas que descrevem apropriadamente processos envolvendo partículas em alta velocidade e de massa pequena, como os átomos e as moléculas e suas partes constituintes, vê-se uma nova e profunda transformação das técnicas e conseqüentemente o surgimento de novas engenharias, de uma nova medicina, da química quântica, de novas máquinas de guerra, das possibilidades da nanotecnologia e da computação quântica, de descrições no contexto atômico-molecular de processos como a catálise, a adsorção e a fotossíntese, e o surgimento da biologia molecular. Dessa maneira, a ciência da mecânica tornou-se um pilar estratégico no desenvolvimento das sociedades ocidentais no período moderno e contemporâneo.

Neste trabalho buscamos evidenciar esta condição estrutural das equações de movimento através de exemplos que mostram conexões entre estas e o desenvolvimento das técnicas e das ciências naturais em geral. A ênfase da discussão concentra-se na identificação de elementos que permitem desenvolver e alcançar a plenitude das técnicas. Da perspectiva aqui considerada, estes elementos estruturam-se na metodologia inicialmente proposta por Newton, e sintetizada nas equações de movimento da mecânica. O eixo da análise tem como pressuposto a idéia de que todos os fenômenos naturais são manifestações do movimento dos entes constituintes de um dado sistema. Portanto, o conhecimento desse movimento permitiria, em princípio, estabelecer as propriedades do sistema na sua totalidade. Assim, sendo qualquer técnica uma manipulação de fenômenos naturais, uma tecnologia para ser estabelecida em seu estado pleno demanda o conhecimento do movimento. Cabe ressaltar que esta identificação não significa uma secundarização dos processos históricos, com suas mediações e determinações sociais, econômicas e culturais. Tais aspectos, per se, constituem elementos para outros estudos, no âmbito das ciências sociais e, por conseqüente, não serão abordados aqui. Apenas extraímos alguns elementos do processo de produção do saber e

suas conseqüências para o desenvolvimento das ciências naturais e das técnicas. Neste contexto, discutiremos também aspectos metodológicos envolvidos na elaboração de uma mecânica.

Como parte da metodologia deste trabalho, e para evidenciar a importância do viés matemático-Newtoniano na abordagem dos sistemas mecânicos, utilizamos um conjunto de exemplos tais que os procedimentos ditos intuitivos e não formais (não-matemáticos) dificilmente levariam a qualquer solução. Escolhemos, em uma lista extensa, um conjunto de sistemas mecânicos que julgamos representativo. Esses exemplos são conhecidos da literatura e nenhuma solução detalhada é apresentada. Contudo, alguns casos emblemáticos, como a descoberta de Netuno e a redução do fenômeno da mutação genética a um problema mecânico, são tratados com mais detalhes a partir dos textos originais, o que revela vários aspectos na direção da nossa análise.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. Na seção 2, discorremos sobre o advento da mecânica de Newton, exemplificando a intervenção das equações de movimento no estudo de problemas mecânicos. Na seção 3, aspectos metodológicos da mecânica clássica são analisados, identificando um programa mecânico Newtoniano de análise da natureza. Na seção 4, referimo-nos ao desenvolvimento empírico e fenomenológico das técnicas na era moderna, com o propósito de ressaltar limitações desses procedimentos para o alcance da plenitude tecnológica. Na seção 5, tratamos da mecânica quântica e do surgimento das novas engenharias e da biologia molecular. Na seção 6, aspectos metodológicos da mecânica quântica são discutidos. Na seção 7, tecemos algumas observações finais.

2. EQUAÇÕES DE NEWTON, CIÊNCIAS NATURAIS E TÉCNICAS CLÁSSICAS

Na Grécia antiga, é Arquimedes (200 AC) o referido como quem mais se dedicou a problemas mecânicos, usando com rigor os métodos matemáticos; e seguindo essa tradição é na Europa, ao longo da Idade Média, onde foram introduzidos um conjunto de conceitos associados com o movimento dos corpos. Assim por exemplo, no sec. XIV Heytesbury, Swinshwad e Dumbleton formularam o conceito de cinemática, como a descrição geométrica do movimento, e a dinâmica, como o estudo das causas do movimento; Casale e Oresme introduziram a maneira de representar os resultados físicos por meios de gráficos; Buridan introduziu o conceito de ímpetus, algo próximo do conceito atual de momentum; e chega-se a Galilei que apresentou, dentre outras coisas, a experimentação como critério de verdade no estudo dos fenômenos naturais [2].

Estes desenvolvimentos levaram à caracterização do movimento de modo geral e matemático, e Newton, nas décadas finais do sec. XVII, estabeleceu sua forma de descrever a natureza, introduzindo e sintetizando as bases gerais que definem a estrutura conhecida por mecânica. Esta descrição pode ser sintetizada nos seguintes elementos constitutivos [3]:

a Os sistemas de referência, a partir dos quais são re-

alizadas as medidas sobre um dado evento ocorrendo no espaço e no tempo;

- b As variáveis dinâmicas, como por exemplo a posição, a velocidade, e a quantidade de movimento e funções destas;
- c O estado de movimento, que é definido por um conjunto completo mínimo de valores de variáveis dinâmicas necessário à caracterização unívoca da situação cinemática do sistema em um dado instante de tempo ¹;
- d A relação de causalidade (equação de movimento) entre estados de movimento do sistema em diferentes tempos. Esta relação satisfaz condições de existência e unicidade, próprias dos processos naturais, e determina como ocorreu, ocorre e ocorrerá a evolução temporal do sistema mecânico ²
- e Uma variável dinâmica contém implicitamente em sua definição um procedimento de sua medida. Isso implica que o construto teórico contenha uma regra que gere um número real, a ser comparado com os resultados da medida para cada variável ³.

Desde então, leva-se adiante a idéia grega de análise dos fenômenos naturais, e passa-se a preparar a natureza nos laboratórios para se obter respostas esperadas a partir da análise das equações de movimento. Os antigos não dispunham de um tal aparato teórico, e quando próximo disso chegaram, fora de modo restrito. Assim os pós-Newtonianos⁴ estavam instrumentalizados e foram capazes de descrever um amplo conjunto de sistemas mecânicos já observados e também transcender, introduzindo sistemas mecânicos novos, por vezes complicados, não encontrados na natureza e que foram propostos em curtos períodos de tempo, quando comparados ao ritmo de desenvolvimento pré-Newtoniano. Surge, a partir de então, uma implementação inédita e sem precedentes nas ciências naturais e nas técnicas, tendo por base a análise das equações de movimento, e quando possível com a determinação das

soluções destas para modelos de sistemas mecânicos. Esses aspectos são evidenciados nos exemplos que seguem ⁵.

2.1. O problema de três corpos

Lagrange, com o uso das equações de movimento, determinou, entre as trajetórias possíveis para o movimento de três corpos de massas m_1 , m_2 e m_3 sob a ação da interação gravitacional mútua, duas famílias de soluções [5]. Em uma delas, os três pontos materiais situam-se sobre uma reta que gira em torno do centro de massa. Neste caso, considerando m_2 localizada entre m_1 e m_3 , e sendo as distâncias entre m_1 , m_2 e m_3 iguais a $r_{13} = r$, $r_{12} = \rho r$ e $r_{23} = \sigma r$, com $\rho + \sigma = 1$ e $0 < \rho < 1$, a velocidade angular é dada por

$$\omega = \sqrt{\frac{(m_2\rho^{-2} + m_3)M}{(m_2\rho + m_3)r^3}},$$

onde $M = m_1 + m_2 + m_3$ é a massa total do sistema

A outra solução estabelece que as três massas estão situadas nos vértices de um triângulo equilátero, girando em torno do centro de massa com uma velocidade angular

$$\omega = \sqrt{\frac{M}{r^3}},$$

em que r é tamanho do lado do triângulo equilátero.

Posteriormente à publicação desses resultados (não triviais), observou-se que o Sol, Júpiter e os pequenos planetas do grupo dos Troianos formavam aproximadamente um triângulo equilátero, dando assim significado astronômico à chamada solução equilátera de Lagrange.

2.2. A descoberta de Netuno

Sem a intervenção das equações de movimento e de métodos aproximativos para resolvê-las, a descoberta do planeta Netuno, através de puras observações, seria possivelmente complicada, se não casual, para qualquer observatório astronômico da época. Com as equações de movimento e a lei da gravitação universal, contudo, foi possível associar as perturbações na órbita do planeta Urano com a possibilidade de existência de um novo planeta ainda não observado, Netuno. O problema geral a ser resolvido é aquele em que dada a trajetória de um corpo, pede-se determinar a força que faz o corpo cumprir esse movimento. Neste caso, da trajetória de Urano, tinha-se um conjunto de pontos conhecidos através

¹ No caso da mecânica Newtoniana, também chamada mecânica clássica, a caracterização do estado é dada por exemplo pelos valores da posição e da velocidade dos entes constituintes do sistema em algum instante de tempo.

² Os itens a, b e c estabelecem a estrutura cinemática da mecânica, enquanto que o item d define a dinâmica.

³ Observe-se que enquanto na cinemática clássica, com o estado de movimento definido por posição e momentum, essa regra é imediata, em formulações do tipo Liouville, onde o estado é definido por densidades no espaço de fase, essa regra precisa ser explicitamente introduzida. Isso é feito através de médias estatísticas.

⁴ É importante destacar que o que se denomina atualmente como mecânica Newtoniana (ou clássica), teve desenvolvimentos que seguiram a Newton - reconhecidamente o fundador das bases gerais da mecânica -, e dentre estas estão as contribuições, entre os séculos XVIII ao XX, de Euler, Lagrange, D'Lambert, Hamilton e Poincaré e Nöther. Entretanto, para alguns como Mach (no fim Sec. XIX), depois que Newton estabeleceu os princípios gerais da mecânica juntamente com a gravitação, o que perdurou fora essencialmente aprimoramentos dedutivos, mas não novos princípios mecânicos [4].

⁵ Gostaríamos de frisar que os exemplos mecânicos, tanto clássicos como quânticos, considerados neste trabalho são conhecidos da literatura (e em particular ao físico), e por isso nenhuma solução detalhada é apresentada. A importância dos mesmos aqui se traduz na evidência do aspecto metodológico introduzido por Newton. Mas além disso, a consulta aos textos originais, em alguns casos, é reveladora da importância da ciência da mecânica para as sociedades européias.

de observações astronômicas⁶, que apresentavam desvios da órbita elíptica. Em uma sequência de trabalhos sobre esse problema, Le Verrier apresenta a sua solução [7–9].

No primeiro trabalho [7], de 10 de novembro de 1845, Le Verrier discute as contribuições dos termos perturbativos devidos a Júpiter e Saturno⁷ com o propósito de compará-las com observações de Paris e Greenwich. Le Verrier exclui a possibilidade de que as divergências na órbita de Urano possam ser atribuídas somente às perturbações devidas a Júpiter e Saturno⁸.

No segundo [8], de 1 de junho de 1846, Le Verrier exclui um conjunto de outras idéias para explicar as perturbações na órbita de Urano tais como, resistência do Éter, satélite acompanhando Urano, queda de um cometa sobre Urano, mostrando não serem estas suposições sustentáveis perante as medidas conhecidas e ante uma análise teórica. A possibilidade de variação da lei da gravitação universal, face a grande distância de Urano do Sol, hipótese também aventada à época para a explicação dos fatos, é descartada por Le Verrier⁹, que conduz então sua linha de análise para a ação de um outro corpo agindo continuamente sobre Urano e mudando seu movimento de maneira muito lenta¹⁰. Após uma outra sequência de análises ele formula o problema que irá resolver¹¹. Ao final deste trabalho é apresentada a longitude heliocêntrica deste possível novo planeta, que seria, em 1 de

janeiro de 1847, de 325 graus.

No terceiro trabalho [9], de 31 de agosto de 1846, Le Verrier comunica à Academia que todas as anomalias observadas no movimento de Urano são, nos mínimos detalhes, explicáveis considerando a força gravitacional de um novo planeta situado além de Urano. Discorre sobre a metodologia empregada para construir e resolver as equações de condição, sete delas obtidas a partir de dezenove observações do período 1690-1771 e vinte e seis a partir de duzentas e sessenta e duas observações do período entre 1781-1845, e apresenta os seus resultados para os elementos da órbita do novo planeta¹²: semi-eixo maior da órbita, 36,154; Ano solar, 217^{ans},387; Excentricidade, 0,10761; Longitude do Periélio, 284^o45'; Longitude média em 1 de janeiro de 1847, 318^o47'; Massa, 1/9300. Corrige também a longitude heliocêntrica para 1 de janeiro de 1847, prevista no artigo anterior, de 325^o para 326^o32' com uma distância ao Sol de 33,06. Observa que o momento é oportuno para a descoberta do planeta¹³. Analisa então a questão da visibilidade do astro, avaliando, comparativamente a dados de Urano, que o seu diâmetro seria de 3",3 e teria um brilho que permitiria ser visto nos telescópios já existentes¹⁴. Segue analisando os limites dos seus resultados e ao final mostra a concordância das posições calculadas com a sua teoria, com as posições conhecidas das observações astronômicas desde 1690 até as mais recentes de 1845.

Por carta, em 18 de setembro de 1846, a Galle, do observatório de Berlim, Le Verrier informa seus resultados e solicita localizar o planeta¹⁵. No mesmo dia em que recebeu a carta, em 23 de setembro de 1846, Galle, com ajuda de seu assistente D'Arrest, logo encontrou um astro de oitava grandeza próximo do local indicado por Le Verrier, e que não existia nos mapas celestes [11]. As observações realizadas nos dois dias seguintes mostraram que o astro seguia uma órbita muito próxima daquela do planeta predito por Le Verrier [11]. As medidas do diâmetro, 2",9 e 2",7, estavam em boa concordância com o valor estimado por Le Verrier [11]. Os resultados de Galle foram confirmados em seguida pelos observatórios europeus [12]. Os resultados teóricos de Le Verrier haviam sido encontrados em data próxima anterior, de modo independente, por Adams¹⁶. Esta descoberta foi considerada uma das mais importantes realizações da

⁶ As observações de Urano estão registradas desde 1690 por Flamsteed e outros antes da identificação deste como um planeta a partir de 1781 por Herschel e outros.

⁷ "Le Mémoire actuel a pour but d'établir la forme et la grandeur des termes que les actions perturbatrices de Jupiter et de Saturne introduisent dans les expressions des coordonnées héliocentriques d'Uranus. Les formules, ainsi obtenues, seront comparées aux observations de Paris et de Greenwich dans une seconde communication." [7]

⁸ "Il resterait à comparer la théorie précédente avec les observations. Mais je ne pourrais pas le faire actuellement d'une manière complète. Il me faudrait, auparavant, examiner l'influence de plusieurs causes qui ont pu introduire des erreurs notables dans les éléments de la théorie d'Uranus. Ces causes sont, au reste, tout à fait étrangères aux actions de Saturne et de Jupiter, que je m'étais proposé d'examiner ici." [7]

⁹ "Je ne m'arrêterai pas à cette idée que les lois de la gravitation pourraient cesser d'être rigoureuses, à la grande distance à laquelle Uranus est situé du Soleil. Ce n'est pas la première fois que, pour expliquer des inégalités dont on n'avait pu se rendre compte, on s'en est pris au principe de la gravitation universelle. Mais on sait aussi que ces hypothèses ont toujours été anéanties par un examen plus approfondi des faits. L'altération des lois de la gravitation serait une dernière ressource à laquelle il ne pourrait être permis d'avoir recours qu'après avoir épuisé l'examen des autres causes, qu'après les avoir reconnues impuissantes à produire les effets observés." [8]

¹⁰ "Il ne nous reste ainsi d'autre hypothèse à essayer que celle d'un corps agissant d'une manière continue sur Uranus, changeant son mouvement d'une manière très-lente. Ce corps, d'après ce que nous connaissons de la constitution de notre système solaire, ne saurait être qu'une planète, encore ignorée. Mais cette hypothèse est-elle plus plausible que les précédentes? N'at-elle rien d'incompatible avec les inégalités observées? Est-il possible d'assigner la place que cette planète devrait occuper dans le ciel?" [8]

¹¹ "Nous sommes ainsi conduit à nous poser la question suivante: Est-il possible que les inégalités d'Uranus soient dues à l'action d'une planète, située dans l'écliptique, à une distance moyenne double de celle d'Uranus? Et, s'il en est ainsi, où est actuellement située cette planète? Quelle est sa masse? Quels sont les éléments de l'orbite qu'elle parcourt? Le problème énoncé en ces termes, je le résous rigoureusement." [8]

¹² "... [L]es longitudes sont comptées à partir de l'équinoxe du 1er janvier 1847; les distances sont rapportées à la moyenne distance de la Terre au Soleil; enfin la masse du Soleil a été prise pour unité." [9]

¹³ "L'opposition de la planète a eu lieu le 19 août dernier. Nous sommes donc actuellement à une époque très-favorable pour la découvrir." [9]

¹⁴ "Examinons quels sont actuellement, au moment de l'opposition, le diamètre apparent et l'éclat relatif de la planète cherchée. ... Nous trouverons ainsi, qu'au moment de l'opposition, la nouvelle planète devra être aperçue sous un angle de 3",3. ... ; que son apparence ne sera pas réduite à celle d'une étoile." [9]

¹⁵ Na carta à J. G. Galle, astrônomo do Observatório Real de Berlin, Le Verrier escreve: "Aujourd'hui je voudrai obtenir de l'infatigable observateur qui'il voulais bien consacrer quelques instants à l'examen d'une region du Ciel, où il peut rester une Planète à découvrir." [10]

¹⁶ Nas secções 1-5 da referência [13], Adams apresenta o problema, localiza as datas das suas contribuições para a resolução do mesmo e observa a proximidade dos seus resultados com os de Le Verrier: "... ; and in June of the present year [1846], he [Le Verrier] followed up this investigation by a memoir, in which he attributed the residual disturbances to the ac-

mecânica clássica até então e a mais importante descoberta planetária, por ser uma previsão teórica a partir das equações de movimento e da lei da gravitação¹⁷.

2.3. O avanço do periélio de Mercúrio

As perturbações da órbita de Mercúrio foram também objeto da atenção de Le Verrier. Sua preocupação com este problema é anterior [15] aos seus trabalhos sobre a órbita de Urano e continuaram [16] após a publicação destes trabalhos e da descoberta de Netuno. Desde logo Le Verrier adverte as grandes dificuldades envolvidas com a análise do problema de Mercúrio. No trabalho de 1859 Le Verrier, para explicar a diferença entre os cálculos teóricos usando a lei da gravitação de Newton e os valores observados do movimento do periélio de Mercúrio, discute a possibilidade de existência de um outro planeta ou de um conjunto de asteroides orbitando entre o Sol e Mercúrio¹⁸, em uma ideia similar à usada para explicar as perturbações da órbita de Urano e que previram a existência de Netuno. Tal planeta nunca foi observado. Mas foi novamente com as equações de movimento, desta vez na forma da relatividade geral, que o problema foi resolvido por Einstein, cujos cálculos previram corretamente avanço do periélio de Mercúrio [18].

2.4. A suspensão Cardan

Ainda que já fosse observado o movimento do pião, sua descrição e generalização para os sofisticados sistemas giroscópicos só pôde dar-se via as equações básicas da mecânica. O movimento giroscópico é o movimento geral de rotação de um corpo rígido com um ponto fixo, O , chamado ponto pivot. Um corpo executando esse movimento é chamado giroscópio. O estado de movimento do giroscópio é descrito como uma rotação, com velocidade angular, $\omega(t)$, em torno de um eixo instantâneo de rotação que passa por O .

tion of another planet at a distance from the Sun equal to twice that of Uranus, and found a longitude for the planet agreeing very nearly with the result which I had obtained [1845] on the same Hypothesis". Ao final da seção 5, Adams reconhece a posição de Le Verrier como o descobridor de Netuno: "I mention these dates merely to show that my results were arrived at independently, and previously to the publication of those of M. Le Verrier, and not with the intention of interfering with his just claims to the honours of the discovery; for there is no doubt that his researches were first published to the world, and led to actual discovery of the planet by Dr. Galle, so that the facts stated above cannot detract, in the slightest degree, from the credit due to M. Le Verrier." Nas seções seguintes, Adams detalha as suas equações e o procedimento usado para resolvê-las e na seção 31 (p. 280) são mostrados os resultados obtidos e a observação de que os mesmos foram comunicados ao Astrônomo Real em Outubro de 1845. Para mais detalhes ver na referência [14]: "The Astronomer Royal read the following Memoir: Account of some circumstances historically connected with the discovery of the Planet exterior to Uranus".

¹⁷ Ver na referência [11]: "Professor Encke remarks, that is by far the most brilliant of all the planet-discoveries, since it is the result of pure theoretical researches, and in no respect due to accident."

¹⁸ Ver as páginas 102-106 da Seção IV "Comparaison de la Théorie avec les Observations" da referência [16] e a referência [17].

Essa velocidade angular pode ser escrita em termos de três componentes, em um sistema de coordenadas qualquer. Em especial, três coordenadas generalizadas (três ângulos), conhecidos por ângulos de Euler, $(\psi, \vartheta, \varphi)$, são introduzidos, de tal forma que as três componentes são dadas por

$$\omega(t) = \left(\frac{d\psi}{dt}, \frac{d\vartheta}{dt}, \frac{d\varphi}{dt} \right),$$

e correspondem aos três movimentos de rotação em torno de três eixos: um fixo, escolhido como um dos eixos de coordenadas do sistema inercial, digamos o eixo z , e os outros dois são denominados por ζ e κ . A componente da velocidade angular, $d\psi/dt$, representa uma rotação em torno do eixo z , e é chamada de precessão do giroscópio. Por sua vez, $d\vartheta/dt$ descreve uma rotação em torno do eixo κ , e é chamado movimento de nutação. A terceira componente, $d\varphi/dt$, é a velocidade angular de rotação em torno do eixo ζ , e é chamada auto-giro do giroscópio (esta última, no caso de um pião, representa a velocidade angular de giro em torno do próprio eixo). Esses três movimentos de rotação são aqueles observados e as equações de Newton para o giroscópio são escritas em termos dos ângulos $(\psi, \vartheta, \varphi)$, e denominadas equações de Euler. Da definição dessas três variáveis independentes, os três ângulos de Euler associados aos três graus de liberdade do sistema, foi possível montar um mecanismo que exibisse a independência cinemática dessas variáveis. Este dispositivo mecânico assim concebido, constituído de um arranjo de mancais, é a chamada suspensão Cardan [19]. As aplicações do giroscópio estão presentes em dispositivos de orientação em geral¹⁹.

2.5. A balística

O movimento paraboloidal dos projéteis, a balística, tratada de modo empírico ao longo de muitos séculos, foi identificado e descrito no âmbito do movimento dos corpos celestes e dos satélites artificiais via as equações da mecânica. O movimento dos corpos em meios resistentes, que intitula o Livro II dos *Principia* [20], e que permitiria um tratamento mais realístico do problema da balística, foi logo abordado por Newton. A balística, desde o seu início, foi um problema de interesse militar, e o desenvolvimento das modernas armas de maior alcance demandava tabelas numéricas obtidas a partir das equações de movimento do projétil, e requeriam um grande esforço de cálculo com os dispositivos de cálculo disponíveis. A demanda por um grande número de soluções numéricas (tabelas) precisas das equações de movimento levou ao desenvolvimento da computação digital atual, que teve seu início marcado pela invenção do computador digital ENIAC (Electronic numerator, integrator and computer), em 1943, capaz de executar cálculos em

¹⁹ Um exemplo no cotidiano são as patinetes produzidas pela empresa Segway, com duas rodas sobre um mesmo eixo de rotação, usualmente vistas em shopping centers. Elas têm o sistema de direção baseado em um conjunto de giroscópios e responde a pequenos movimentos de inclinação para frente (partir), para trás (parar) e para os lados (curvas à esquerda e direita) do condutor.

tempos menores que os mais desenvolvidos computadores analógicos da época²⁰.

2.6. A fisiologia e a biofísica

Observe-se também as contribuições da mecânica de Newton para o desenvolvimento das áreas biomédicas. Vejamos, por exemplo, a fisiologia, que segundo Guyton [22], consiste no estudo do funcionamento da matéria viva, procurando explicar os fatores físicos e químicos responsáveis pela origem, desenvolvimento e progressão da vida. Esta procura do entendimento do funcionamento da matéria viva, que remonta a fisiologia de Aristóteles, encontrou, com a proposição da mecânica Newtoniana e seu conceito de causalidade, o esteio que a definiu como conhecimento científico. Assim Newton, nos Principia, Livro III, quando formula as regras de raciocínio em filosofia natural, em particular na Regra II, quando estabelece a unicidade nas relações de causalidade dos processos naturais (ver a Seção 3), exemplifica: ... *efeitos iguais têm causas iguais. ... Assim, a respiração no homem e na besta têm a mesma causa* [20]. Ou seja, passa-se a descrever o conjunto dos sistemas e processos fisiológicos no nível macroscópico via uma diversidade de parâmetros mecânicos e outros empírico-fenomenológicos (elétricos, químicos e termodinâmicos), todos sob a égide da Regra II. Neste mesmo sentido geral, a circulação do sangue passa a corresponder a uma caracterização cinemática do sangue como um fluido em movimento. Assim, fez-se necessário uma formulação mecânica do processo, a partir da dinâmica dos fluidos, a fim de se desenvolver métodos de controle e parametrização do processo circulatório, ao nível de detalhes. Desse modo introduz-se e mede-se quantidades como potência de ação muscular cardíaca, velocidade de condução sangüínea, pressão arterial, pressão venosa, débito cardíaco, entre outras. E como estes, estudos mecânicos foram aplicados, de modo geral, a fisiologia humana e animal, isto é, à ortopedia, sistema de audição, sistema respiratório, etc. [22], com enorme consequência para o desenvolvimento das áreas médicas²¹.

²⁰ O ENIAC era um computador de propósitos gerais, que foi projetado para calcular tábuas balísticas no campo de testes de Aberdeen, em Maryland, do exército americano [21]. Para produzir uma dessas tabelas, a mais rápida das máquinas de computação da época, o analisador diferencial de V. Bush, despendia da ordem de 15 minutos contra 7 segundos do ENIAC.

²¹ Embora não se trate de um exemplo de uso da mecânica no desenvolvimento da fisiologia, para dar-se uma medida da importância de Newton nas bases do desenvolvimento da medicina, vale citar a análise do próprio Newton, usando seus princípios da ótica, para explicar a fisiologia do olho humano. Assim no seu Optics, Livro I, Parte I, Axioma VII [23], Newton exhibe um motivo para a perda da visão com a idade: "... if the humours of the eye by old age decay, so as by shrinking to make the cornea and coat of the crystalline humour grow flatter than before, the light will not be refracted enough, and for want of a sufficient refraction will not converge to the bottom of the eye but to some place beyond it, and by consequence paint in the bottom of the eye a confused picture, and according to the indistinctness of this picture the object will appear confused. This is the reason of the decay of sight in old men, and shows why their sight is mendend by spectacles."

2.7. Previsões metereológicas

A utilização das equações de movimento para fluidos, como as equações cinéticas de Boltzmann e Bernoulli, tratando os fluidos da atmosfera terrestre a partir de uma teoria de bases mecânicas, juntamente com o advento da atualmente chamada computação de alto desempenho, tem viabilizado o avanço nas previsões metereológicas. Em geral os movimentos dos fluidos atmosféricos, dentro de modelagens propostas, são descritos por equações não lineares²², que tratam de um ponto de vista mecânico um sistema complexo, que apresenta campos de temperatura e pressão. As dificuldades para encontrar soluções para tais equações são estruturais, no sentido matemático, e alcança a teoria dos sistemas dinâmicos.

2.8. As engenharias clássicas

A partir de Newton, as técnicas sofrem mudanças radicais quanto à capacidade de projetar novas estruturas, máquinas e dispositivos em geral. Assim desde a otimização de antigas técnicas como a navegação, com novos padrões de velas e cascos de veleiros velozes como os *Clippers Express* ou os atuais veleiros de 70 pés da classe *Volvo-Racing* capazes de desenvolver velocidades de até 35 nós, o projeto e construção de máquinas, a proposição e cálculo de novas estruturas, como a da torre Eiffel, a maquinaria e as técnicas empregadas na construção dos canais de Suez e Panamá, o desenvolvimento da mecânica fina, o cálculo estrutural de aeronaves, os motores de pistão e as turbinas a jato, dentre uma "infinitude" de outras máquinas, estruturas e dispositivos, as engenharias clássicas atingem a maturidade no final de século XX com o desenvolvimento da computação de alto desempenho e a pesquisa de novos materiais.

Resumidamente, podemos dizer, sem demérito para com a habilidade dos antigos arquitetos e artesãos, que é a partir da mecânica de Newton, juntamente com um conjunto de definições e conceitos associados (corpo rígido, tensor de inércia, fluido ideal, campo de velocidades, forças de vínculo, trabalho mecânico, trabalho virtual, torque, momento angular, energia mecânica, leis de conservação, e outros), com as teorias fenomenológicas da elasticidade, da termodinâmica, do eletromagnetismo e com o desenvolvimento de materiais, que se iniciam, fundamentam e avançam as diversas engenharias modernas de estrutura, mecânica, hidráulica, elétrica, naval e aeronáutica.

3. ASPECTOS METODOLÓGICOS DO ESQUEMA NEWTONIANO

A partir dos pressupostos mecânicos propostos por Newton, os sistemas são tratados como constituídos de corpos de extensão finita, deformáveis ou não, e pontos materiais, as

²² Ver por exemplo a Ref. [24]

partículas. Para o estudo do movimento das partículas Newton trabalha com as ações impressas na direção do movimento e as ações centrípetas, aplicadas ortogonalmente à direção do movimento, desde que o movimento dos pontos materiais se dá em qualquer instante ao longo de linhas retas ou curvas. O movimento dos corpos de extensão finita são, em geral, conjugações de rotações, translações e oscilações. Em particular, para os corpos não-deformáveis (rígidos), o movimento mais geral é a combinação de translações e rotações, sendo descritos por apenas seis variáveis independentes, como por exemplo, as três variáveis para a rotação, como os ângulos de Euler descritos anteriormente no exemplo do giroscópio, e as três variáveis para descrever o movimento do centro de massa. Resulta então que os fenômenos dentro do programa de Newton são descritos a partir de conceitos de aceleração centrípeta e tangencial no caso de partículas, e com a adequação desses conceitos e uma escolha conveniente de coordenadas, para o estudo dos movimentos de rotação e oscilação. A idéia central do programa Newtoniano é a redutibilidade e conseqüente descrição de todos os fenômenos naturais, utilizando um pequeno conjunto de elementos cinemáticos. Newton anuncia o seu programa já no prefácio da primeira edição do *Principia*²³:

Gostaria que pudéssemos deduzir o resto dos fenômenos da natureza pelo mesmo tipo de raciocínio a partir de princípios mecânicos; pois estou induzido por muitas razões a suspeitar que todos eles podem depender de certas forças pelas quais as partículas dos corpos, por causas até então desconhecidas, se atraem mutuamente, formando figuras regulares, ou de modo contrário, repelem-se, afastando-se umas das outras; sendo estas forças desconhecidas, os filósofos vêm tentando o conhecimento da natureza em vão. Mas acredito que os princípios aqui estabelecidos, lançarão alguma luz, ou sobre este, ou sobre algum verdadeiro modo de filosofar.

Além disso, Newton define um dos elementos essenciais da chamada metodologia científica ao estabelecer a sua Regra IV no Livro III [20]: “Em filosofia experimental, procuramos proposições estabelecidas por induções gerais a partir dos fenômenos tão acuradamente ou aproximadamente verdadeiras...”

A estrutura metodológica Newtoniana classifica os problemas mecânicos em dois tipos: problemas com e sem vínculos. Os problemas sem vínculos desdobram-se em dois. O primeiro tipo é aquele em que é conhecido a evolução temporal (as trajetórias) das partes constitutivas do sistema mecânico, e deseja-se determinar as forças que fazem cumprir tais movimentos. O segundo tipo é aquele em que são conhecidas as forças sobre as partes constitutivas do sistema mecânico, e deseja-se determinar sua evolução temporal (as trajetórias). Vejamos exemplos do primeiro tipo de problema sem vínculos tratados por Newton:

Proposição XI, Problema VI (The Principia [20], Livro I): Se um corpo evolui em uma elipse, é requerido encontrar a lei da força centrípeta tendendo para o foco da elipse.

Proposição XII, Problema VII (The Principia [20], Livro I): Suponha que um corpo se move em uma hipérbole; é requerido encontrar a lei de força centrípeta tendendo para o foco da figura.

Nos dois problemas, Newton encontra a solução de que a força é inversamente proporcional ao quadrado da distância do corpo a um dos focos. Tais resultados são utilizados, juntamente com a Regra IV (acima) para que Newton proponha a sua lei da gravitação universal. Seu procedimento é descrever os fenômenos em um sentido geral e a partir disso demonstrar proposições e teoremas. Vejamos um exemplo de fenômeno e proposição que aparecem no estabelecimento da lei da gravitação universal:

Fenômeno VI (The Principia [20], Livro III): A Lua, através de um raio desenhado a partir do centro da terra, descreve uma área proporcional ao tempo de evolução.

A partir da constatação de fenômenos como o VI (similar análise é conduzida para os satélites de Júpiter, e Saturno, bem como aos cinco primeiros planetas, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, orbitando em torno do Sol), a lei de força vai sendo estabelecida. A partir do Fenômeno VI, Newton propõe:

Proposição III, Teorema III (The Principia [20], Livro III): A força pela qual a Lua é retida em sua órbita tende para a terra, e é inversamente proporcional ao quadrado da distância de sua posição ao centro da terra.

Em um primeiro momento, para propor a lei da gravitação, Newton assume aproximações tratadas a posteriore. Assim, por exemplo, para estabelecer a Proposição III (acima citada), o efeito da interação com o Sol é desprezado. A Proposição XXV, Problema VI do Livro III [20], trata de encontrar a força com a qual o Sol perturba o movimento da Lua em torno da terra.

Exemplifiquemos alguns problemas de sistemas sem vínculos do segundo tipo. Newton tratou, considerando a lei da força gravitacional, várias casos deste problema, como a determinação da inclinação da órbita da Lua em relação ao plano da eclíptica (Proposição XXV, Problema XVI, livro III [20]), análise das marés (Proposição XXVI, Problema XVII, livro III [20]), a precessão dos equinócios (Proposição XXXIX-Problema XX, livro III [20]), além de empreender, a partir do Lema IV, Livro III [20], uma análise sobre os cometas para concluir :

...que os cometas são um tipo de planeta em uma órbita extremamente excêntrica em torno do Sol...

Em sua análise, partindo da lei da gravitação, aparece outro conjunto de proposições e problemas como por exemplo:

²³ Esta tradução, assim como as que se seguem de trechos do texto dos Principia [20], foram realizadas pelos autores.

Proposição XLI, Problema XXI, Livro III [20]: A partir de três observações dadas, Newton aplica sua teoria ao cometa do ano de 1680, analisado por Flamsted e Halley. Na sequência, investiga a formação da cauda do cometa, um problema complicado para a época, como matéria proveniente da cabeça do cometa, analisando, ao fim do Problema XXI, em particular, as observações de Storer, na Inglaterra, e de Estancius, no Brasil (ver Livro III, p. 293).

De um ponto de vista das tecnologias, o mesmo tipo de análise de problemas sem vínculo se aplica atualmente na colocação de um satélite artificial em torno da terra. Ou seja, são estabelecidas as condições iniciais para que um satélite possa ser posto em uma dada órbita específica.

Os problemas com vínculos podem ser subdivididos em alguns sub-problemas, quanto ao tipo de vínculo, mas não nos ocuparemos desta subdivisão aqui. Apenas trataremos de dois exemplos de sistemas com vínculos. Em um caso são dadas as forças externas e condições cinemáticas, ou seja, equações de vínculos, oriundas de alguma condição física pré-estabelecida como por exemplo, a impenetrabilidade dos corpos, a inextensibilidade e/ou absoluta flexibilidade dos cabos, entre outras, a serem cumpridas pelo sistema mecânico. Deseja-se então determinar a parte desconhecida do movimento, se for o caso, e as forças que fazem cumprir as restrições cinemáticas, ou seja as forças de vínculo, como reações normais, tensões e trações, etc.²⁴

Um exemplo de como os vínculos podem simplificar o estudo de um sistema mecânico é o corpo rígido, modelado como um conjunto de N partículas, cada qual necessitando de três variáveis para a especificação de sua localização no espaço. Assim, a princípio, tal sistema seria descrito por $3N$ graus de liberdade. Contudo, segue da condição física de rigidez assumida, que as distâncias entre as partículas não variam durante o movimento²⁵ e isso gera $3N - 6$ condições cinemáticas e o conjunto de $3N$ variáveis, em geral muito grande, é reduzido para um conjunto de apenas seis.

Dentro do programa da engenharia, um exemplo de problema com vínculos é aquele que envolve a construção de uma estrutura para operar em condições estáticas. Nesse caso, é conhecido o estado de movimento das partes constituintes, qual seja o repouso, e as forças externas aplicadas, quais sejam, os pesos próprios e as cargas. Assim é conhecido o estado particular de movimento do sistema mecânico. Deseja-se então determinar as forças de vínculo que cumprirão esta condição e assim, dimensionar corretamente as partes da estrutura em consonância com os materiais disponíveis. As qualidades e características, como a resistência à tração, compressão, torção, etc., desses materiais são também, por sua vez, estabelecidas pela análise do seu

comportamento mecânico. Em um contexto similar, é estabelecido o programa da engenharia mecânica na construção de máquinas e dispositivos em geral. Nesse caso, o dimensionamento das partes constitutivas do sistema, em função dos esforços e dos materiais empregados, é para que um sistema mecânico com vínculos execute movimentos desejados a partir de forças motrizes dadas.

Por fim, devemos ressaltar que dentro do esquema metodológico da mecânica de Newton, ao adotar-se a validade de uma relação de causalidade satisfazendo condições de existência e unicidade, que se acredita próprias dos processos naturais, admite-se a possibilidade de resolução de todo e qualquer problema mecânico. Isto inspira os procedimentos aproximativos de resolução de equações de movimento, para tratar sistemas complexos de soluções não triviais²⁶

4. O DESENVOLVIMENTO EMPÍRICO E FENOMENOLÓGICO DAS TÉCNICAS

Deve-se observar que no período pós-Newtoniano, as técnicas nem sempre foram, ou têm sido obtidas, de uma formulação puramente mecânica de processos elementares. Destaca-se neste contexto a presença de conteúdo empírico no desenvolvimento da fisiologia, da medicina e da química, bem como no desenvolvimento das máquinas térmicas e dos dispositivos eletromagnéticos, oriundos das teorias fenomenológicas do calor (termodinâmica) e do eletromagnetismo. A termodinâmica e o eletromagnetismo influenciaram no estabelecimento da fisiologia, medicina e química clássicas e é da teoria fenomenológica do eletromagnetismo que surgem, a partir de descobertas como a de Volta, Oestered e Faraday, as bases da engenharia elétrica-eletrônica. Contudo, estas técnicas refletem apenas alguns dos aspectos captáveis ao nível macroscópico dos fenômenos. Estas esgotam-se pelo fato de não descreverem os fenômenos a partir do movimento das partes constitutivas dos sistemas, limitando assim o alcance de suas possibilidades de desenvolvimento. Atingir a plenitude dessas técnicas demanda um conteúdo mecânico microscópico na formulação dos seus princípios e nas suas equações básicas. Observe-se, entretanto, que, embora a acumulação empírica de conhecimento e as teorias fenomenológicas no período pós-Newtoniano careçam de um conteúdo mecânico microscópico, elas foram realizadas e elaboradas sob a égide das regras Newtonianas de raciocínio em filosofia natural, como definidas no início do livro III dos *Principia* [20]. Estes aspectos podem ser analisados com as formulações da termodinâmica e do eletromagnetismo, duas bem estruturadas teorias fenomenológicas. A procura da plenitude destas teorias e das técnicas delas advindas, pela via da mecânica, levou ao que hoje se conhece por mecânica estatística e eletrodinâmica quântica. Para maior clareza desses aspectos mecânicos na estrutura da fenomenologia, vamos

²⁴ As forças de vínculo têm sua origem na composição atômica/molecular da matéria e na interação eletromagnética e não podem ser determinadas de modo outro, senão como parte da solução do problema mecânico macroscópico.

²⁵ Forças interatômicas/moleculares, juntamente com outras características macroscópicas do corpo, mantêm fixas essas distâncias e determinam a coesão do corpo, sua resistência à deformações ou fragmentação durante o movimento.

²⁶ Por exemplo métodos variacionais e métodos perturbativos.

averiguar os elementos metodológicos de Newton presentes na axiomatização da termodinâmica e o desenvolvimento das bases microscópicas dos fenômenos térmicos

A estrutura formal da termodinâmica do equilíbrio [25, 26], enquanto um método geral de abordagem da natureza, pode ser colocada em uma forma similar à construção de Newton para os sistemas mecânicos, destacando-se os aspectos cinemáticos e dinâmicos da teoria, mas observando-se contudo que as bases empíricas são diferentes²⁷:

a) A definição das variáveis térmicas do sistema e processo de mensuração se dá através do estabelecimento de vínculos e paredes. Assim temos, para um sistema simples, variáveis como número de moles, volume e energia interna, pressão, temperatura, entropia, entre outras. A energia é definida com os mesmos atributos que os mecânicos, ou seja, é capacidade do sistema para realizar trabalho. A conservação da energia, contudo, é no contexto da termodinâmica estabelecida como uma lei²⁸, através das bases empíricas estabelecidas com os experimentos de Joule, sobre o equivalente mecânico do calor.

b) O conceito de estado térmico é proposto como um conjunto de variáveis térmicas escolhidas *a priori*. No caso de um sistema simples, esse conjunto pode ser a energia, o volume e o número de moles. Assim, com o conceito de estado e variáveis térmicas, os aspectos cinemáticos da teoria ficam estabelecidos

c) O aspecto dinâmico, mais uma vez, procura estabelecer uma relação causal entre os diferentes estados de um sistema térmico, e é dado através da primeira lei (devida a Joule) e da segunda lei de crescimento da função entropia, que é equivalente aos enunciados de Kelvin e Clausius. A demonstração da equivalência é feita através do teorema de Clausius. Então, a condição dinâmica fica estabelecida por se encontrar uma expressão para a entropia, que é denominada de equação fundamental, ou ainda, de modo equivalente por se encontrar as chamadas equações de estado²⁹.

Um modelo da termodinâmica na formulação de equações de estado é aquele que descreve um sistema térmico conhecido como gases ideais, ou seja [25]

$$PV = nRT, \quad T = \frac{3}{2}nRE,$$

onde P é a pressão, V é o volume ocupado pelo gás, n é o número de moles, T é a temperatura, E é a energia interna e R é a constante universal dos gases.

Dado o esquema teórico da termodinâmica do equilíbrio, a questão passa a ser a seguinte: desenvolver modelos para sistemas térmicos, através das equações de estado. As dificuldades em se obter tais equações conduziu a uma análise do problema térmico, sob bases mecânicas microscópicas. Assim, por exemplo, em 1873 J. D. van der Waals propôs uma equação de estado baseada em hipóteses moleculares para a formulação de um modelo de gás mais realístico que aquele descrevendo os chamados gases ideais [25]. Entre suas hipóteses básicas, van der Waals assume um volume finito para as moléculas constitutivas de um gás, levando em conta assim um efeito de força repulsiva entre as moléculas, para moléculas muito próximas umas das outras, de tal sorte que o volume efetivo ocupado por cada uma passa a ser $V_{ef} = V - nb$, onde b é um parâmetro caracterizando a dimensão molecular, determinado experimentalmente. Considerando efeitos de atração molecular, a pressão do gás pôde ser obtida como

$$P = \frac{nRT}{V - nb} - an^2,$$

onde a é um parâmetro de interação molecular, também determinado experimentalmente. Esta é a conhecida equação de van der Waals, que tem sido um ponto de partida para o estudo de diversas propriedades dos líquidos.

Em outra vertente, Boltzmann, seguindo o programa de Maxwell, utiliza argumentos mecânicos combinados com elementos da teoria de probabilidade para deduzir uma equação descrevendo um fluido em movimento; estabelecendo assim bases microscópicas da teoria cinética. O programa de Maxwell, van der Waals, Boltzmann e outros, foi desenvolvido dando origem ao que hoje se conhece como mecânica estatística. As bases gerais dessa teoria, para descrever processos macroscópicos no equilíbrio, foi proposta pelo físico americano W. Gibbs no início do século XX. O esquema de Gibbs pode ser assim resumido:

- a) Estabelece-se um modelo mecânico microscópico para a interação entre as partículas constitutivas de um sistema macroscópico, por exemplo a interação entre as moléculas de um gás, admitindo-se que cada partícula está submetida as leis da mecânica.
- b) Por um processo bem definido de médias estatísticas, deduz-se equações de estado descrevendo o sistema térmico macroscópico, então regido pelas leis da termodinâmica.

Podemos dizer, desse modo, que a estrutura teórica da mecânica estatística, partindo de bases mecânicas, garantem um esquema sistemático para a dedução de equações de estado, apontando assim para a plenitude mecânico/Newtoniana dos sistemas térmicos no equilíbrio. Este método tem sido amplamente empregado no estudo

²⁷ Ver os itens a,b,c, e d na secção 2 e a Referência [3]

²⁸ Na mecânica, a conservação da variável dinâmica energia é deduzida como um teorema, o teorema de Nöther, e associada a uma simetria.

²⁹ Existem quatro formulações equivalentes para a termodinâmica (do equilíbrio) [25]: (i) formulação em termos da equação fundamental usando a representação da entropia ou da energia – neste caso as equações utilizam apenas variáveis extensivas como volume, energia, entropia e número de moles; (ii) formulação em termos de equações de estado, utilizando apenas variáveis intensivas como densidade de massa, densidade de energia, temperatura; (iii) formulação em termos de potenciais termodinâmicos – neste caso a equação fundamental é reescrita, via uma transformada de Legendre, em termos de variáveis intensivas e extensivas. Este é o caso da energia livre de Helmholtz, uma função da temperatura, volume e número de moles, no caso de sistemas simples; (iv) formulação em termos de coeficientes como calor específico e compressibilidade. Cada uma dessas formulações possui sua vantagem específica, sendo que as que estão mais diretamente associadas aos fatos experimentais são as (ii) e (iv). Cabe observar também, que a terceira lei da termodinâmica garante a consistência da teoria, e fixa a escala absoluta de temperatura [26]

de sistemas termodinâmicos, como sistemas magnéticos, redes neurais, sólidos, líquidos, plasmas e outros. Ressalte-se que diversos desses sistemas estudados são vistos como uma fonte promissora de tecnologia, como é o caso de sistemas magnéticos e suas diversas fases. De fato a mecânica estatística pode ser considerada como uma versão realista da mecânica pois, para todos os fins práticos, qualquer sistema mecânico estará mais próximo da realidade se considerado não isolado, exceto o universo em si, e sim sujeito a efeitos térmicos.

De forma similar, com os elementos metodológicos de Newton presentes, estabeleceu-se a estrutura da teoria fenomenológica do eletromagnetismo, resumida nas conhecidas equações de Maxwell. E da mesma forma como se desenvolveram as bases microscópicas da teoria fenomenológica dos sistemas térmicos, surgiu também a eletrodinâmica (microscópica) associando o campo eletromagnético ao movimento das cargas elétricas. O ponto culminante desta teoria, a eletrodinâmica clássica, se dá com a teoria de Lorentz, no fim do século XIX, que buscava a redução de todos os fenômenos eletromagnéticos ao movimento do elétron, o portador de carga até então conhecido [27].

Por outro lado, é baseado na análise do eletromagnetismo, motivado pela lei de Faraday, e usando uma nova cinemática, que Einstein propôs a sua eletrodinâmica das cargas em movimento, também conhecida como a teoria da relatividade restrita. Esta reflete essencialmente a estrutura de simetria das equações de Maxwell, generalizando então a simetria Galileana das equações de movimento da mecânica clássica. Resulta disto que a estrutura do espaço e tempo fica decodificada sob as bases de uma geometria, o espaço de Minkowski, e a mecânica desenvolvida neste contexto descreverá apropriadamente partículas com velocidades muito altas. No limite de baixas velocidades, a mecânica como proposta por Newton é rededuzida. Com a elaboração da teoria da relatividade restrita, o problema da interação instantânea, presente na lei da gravitação de Newton, foi revisto e conduziu a teoria da relatividade geral³⁰.

Destarte o desenvolvimento da teoria de Lorentz (enquanto uma teoria mecânica para o movimento do elétron), a inexistência de uma equação de movimento adequada para essas partículas (subatômicas) não permitiu a viabilização desse programa. A crítica e a consequente generalização da mecânica de Newton para tratar com tais partículas se dá com a mecânica quântica na segunda metade da década de 1920.

Antes de tratarmos especificamente da mecânica quântica, reportemo-nos brevemente ao processo de acumulação de conhecimento sobre a natureza microscópica e eletromagnética da matéria. Este conhecimento veio sendo catalogado empírica e fenomenologicamente desde os antigos alquimistas, passando pelos primeiros tempos da química com conceitos como o de átomo, molécula, valência, diversos tipos de ligação química, características ácidas ou

básicas, ou ainda eletronegatividade e eletropositividade das substâncias. Ápices de tal catalogação são, por exemplo, a hipótese de Avogadro, a tabela periódica de Mendeleev e as regras de combinação química de Lewis[28] e Langmir[29]. Entretanto, nesta catalogação estes conceitos, assim como os entes molécula, átomo, núcleo atômico e elétron, são destituídos de características mecânicas; isto é, não são propostos e caracterizados a partir de suas cinemáticas específicas³¹. A aceitação e a utilização do conceito de partícula subatômica como entes regidos por equações de movimento, só se dá definitivamente nas primeiras décadas do século XX³².

5. AS EQUAÇÕES DA MECÂNICA QUÂNTICA: AS NOVAS ENGENHARIAS E A BIOLOGIA MOLECULAR

No período que antecedeu a proposição da mecânica quântica, entre 1900 e 1925, outras idéias, propondo quantização de variáveis dinâmicas, foram apresentadas para tratar os problemas em nível atômico e da radiação. Essas teorias são usualmente chamadas de velha mecânica quântica, e baseavam-se em uma mistura de elementos da mecânica analítica (uma elaboração matemática da mecânica de Newton, mais especificamente as formas de Lagrange e Hamilton), com a noção “estranha” de quantização de variáveis dinâmicas, como a energia e o momento angular. Os mais famosos trabalhos neste sentido são: o de Planck em 1901, que introduziu a quantização da energia para tratar o problema do corpo negro; o de Einstein em 1905, que usou a idéia de Planck para explicar o efeito foto-elétrico, dando origem ao conceito de fóton; e o de Bohr em 1913, que quantizou o momento angular.

A descoberta de uma equação de movimento apropriada para a descrição do movimento das partículas de massa pequena, o elétron por exemplo, aconteceu no biênio de 1925-27, com os trabalhos de Heisenberg, Dirac e Schrödinger - a mecânica quântica. A partir de então, como desejado por Newton³³, fica aberta a possibilidade de explicação das propriedades da matéria sólida, líquida ou gasosa por uma via mecânica consistente. Novos sistemas mecânicos são

³¹ Distintamente do átomo cúbico de Lewis (1916) e da generalização deste (a regra do Octeto) de Langmuir (1919), os átomos e as moléculas em Bohr (1913) são entes constituídos de partículas, núcleos e elétrons, satisfazendo equações de movimento e definidas condições de quantização sobre as variáveis dinâmicas destas partículas. Para estudar a formação e a estabilidade dos sistemas com mais de um núcleo (moléculas) Bohr não utiliza conceitos não-mecânicos, como ligação ou regras de combinação química.

³² Este fato é exemplificado com a posição dos chamados energeticistas, como Planck, Lodshimdt, Ostwald, dentre outros, que liderados por Mach, defendiam a termodinâmica como a mais perfeita das teorias formuladas, sendo desnecessária considerações obscuras sobre a natureza de partículas básicas. Ao final do século XIX, Boltzmann liderava a oposição aos energeticistas, tendo ocorrido reuniões acadêmicas de grande monta para tratar destas questões, com especial atenção ao debate de Göttingen em 1895, do qual sai como vencedora a posição dos energeticistas defendida por Ostwald. Em 1916 Ostwald veio a público reconhecer que a concepção de partícula fora historicamente vencedora [30]

³³ Ver nossa citação de Newton no primeiro parágrafo da seção 3.

³⁰ Na relatividade geral, a cinemática fica redefinida com a curvatura do espaço-tempo de Minkowski [18]. Uma apropriação tecnológica desta curvatura do espaço-tempo é o sistema GPS (do inglês, Global Position System).

propostos teoricamente, constituídos por fótons, elétrons e núcleos, átomos, moléculas e agregados destes. Imediatamente foi possível descrever a estabilidade atômica e deduzir a tabela periódica. Ademais, o programa de Newton-Lorentz pôde ser então desenvolvido; isto é, os fenômenos óticos, da condução elétrica, do magnetismo, as propriedades mecânicas, acústicas e térmicas puderam ser reduzidos a problemas mecânicos envolvendo fótons, elétrons, núcleos, átomos e moléculas. Os fenômenos químicos no escopo da nova mecânica são então descritos como processos envolvendo sistemas de partículas sob a ação da interação eletromagnética. Isto deu origem às áreas hoje denominadas de física atômica e molecular e química quântica. Como consequência, a antiga classificação dos fenômenos em físicos e químicos desaparece³⁴. No contexto da mecânica quântica, os conceitos de átomo e molécula, introduzidos na química como entes primitivos da composição da matéria, úteis no cálculo estequiométrico e na descrição dos processos químicos em geral, mas desprovidos de conteúdo mecânico, aparecem agora como sistemas mecânicos constituídos de partículas interagindo através da força eletromagnética. Ou seja, efetua-se assim a redução dos processos químicos a processos mecânicos. De maneira similar aos fenômenos químicos, os processos biológicos passam também a ser vistos, no escopo da nova mecânica, como processos envolvendo sistemas de partículas sob a ação da interação eletromagnética. Novos horizontes científicos e tecnológicos são então descortinados. Chega-se à descrições mecânicas de processos como a catálise, a adsorção, a fotossíntese, ao transistor, aos dispositivos semicondutores nos seus mais variados tipos, presentes em toda eletrônica e formas integradas compondo os *chips* da micro-eletrônica dos dias atuais, ao laser, ao microscópio eletrônico, à produção de novas moléculas com propriedades desejadas, às simulações computacionais como ferramentas auxiliares para o desenvolvimento de novos fármacos, às tecnologias espectroscópicas³⁵, às possibilidades da nanotecnologia e da computação quântica. Chega-se à Biologia Molecular.

Para situar essas contribuições advindas da equação de movimento de 1925, analisamos no que segue alguns exemplos.

5.1. O transistor de Bardeen, Brattain e Shockley

Um amplificador eletrônico é um circuito elétrico com a propriedade de que se um sinal elétrico é aplicado aos terminais de entrada do circuito, este sinal aparecerá com semelhantes características nos terminais de saída, porém multiplicado por um fator f , chamado fator de amplificação [32]. O primeiro amplificador eletrônico, utilizando o triodo, uma válvula termoiônica, foi patenteado por De Forest em

1906 [21]. A invenção deste circuito elétrico estabeleceu um forte avanço na indústria eletrônica [33]. Em uma geometria típica, o triodo é uma válvula contendo três elementos cilíndricos coaxiais em vácuo: um catodo, emissor de elétrons; um anodo (placa), receptor de elétrons; e a grade de controle, cuja função é regular o fluxo de elétrons entre o catodo e o anodo, a chamada corrente de placa.

Duas idéias patenteadas de utilização de materiais semicondutores em circuitos amplificadores são de 1930 e 1935³⁶. Em ambos os casos, o processo de amplificação usaria a modulação da condutância de filmes finos do material semicondutor. O transistor³⁷, um triodo semicondutor, e sua utilização como amplificador, efetuando as funções da válvula triodo, foi proposto por Bardeen e Brattain em 1948 [32]. Este transistor era constituído de um pequeno bloco de germânio, um elemento semicondutor, com uma face em contato com uma superfície condutora, base, e dois contatos de ponta condutores, emissor e coletor, colocados próximos um do outro a uma distância entre 0,005 e 0,025 cm na face oposta à base. Tanto para válvulas triodo como para o triodo semicondutor (transistor), pode-se determinar experimentalmente as curvas características e a partir destas o comportamento e propriedades desses elementos, como o fator de amplificação e regiões de operação. Essas curvas são relações envolvendo as correntes e as diferenças de potencial do circuito amplificador [32].

Bardeen e Brattain conceberam um circuito amplificador a partir das propriedades retificadoras e outras propriedades mecânico-quânticas do germânio. Segundo a descrição da invenção pelos autores [32], a descoberta deu-se na sequência de estudos experimentais e teóricos sobre as propriedades mecânico-quânticas dos retificadores de silício e germânio³⁸. Um processo de amplificação era então esperado ocorrer se houvesse um fluxo de buracos entre os dois eletrodos de contato, através da camada superficial do cristal. A partir desta idéia foi construído o primeiro amplificador de estado sólido, realizando as funções até então desempenhadas pela válvula triodo. Na sequência da descoberta, como descrita no artigo de 1949, tornou-se claro com experimentos, que o fluxo de buracos acontecia também através do volume³⁹.

Um elemento distintivo essencial da invenção de Bardeen e Brattain, com relação às proposições de amplificador citadas anteriormente, está na forma como as propriedades mecânico-quânticas do meio ativo, um semi-condutor, foram utilizadas para entender o comportamento amplificador do sistema. Este elemento distintivo é o resultado do uso das equações de movimento da mecânica quântica na concepção

³⁴ Esta classificação, separava os fenômenos em químicos ou físicos, pela modificação ou não das estruturas moleculares no processo.

³⁵ Inclua-se nestas tecnologias, os métodos não invasivos, presentes nos procedimentos médicos atuais, como a ressonância nuclear magnética (NMR). Esta descoberta, publicada em 1946 por E. M. Purcell, conferiu-lhe o prêmio Nobel de Física em 1952.

³⁶ Ver a referência Ref. [21], páginas 91 e 101.

³⁷ Acrônimo das palavras em inglês *transfer* e *resistor*.

³⁸ A propriedade de que em uma dada porção de matéria a corrente elétrica possa circular em um único sentido não é explicável dentro do escopo da mecânica e do eletromagnetismo clássicos. O fenômeno só foi entendido com o advento da mecânica quântica.

³⁹ Ver na Ref. [32]: "... One question that may be asked is whether the holes flow from the emitter to the collector mainly in the surface layer or whether they flow through the body of germanium. ..., at the suggestion of W. Shockley, J. R. Haynes further established that holes flow into the body of the germanium."

do processo de amplificação. Ou seja, a partir de uma teoria microscópica mecânica descrevendo o processo de condução da carga elétrica no cristal semicondutor, em particular com a análise da equação de movimento estacionária aplicada ao movimento dos elétrons dos sólidos cristalinos e utilizando os conceitos mecânicos quânticos como buracos, estados estacionários, nível de Fermi, estrutura de bandas de energia em semicondutores, impurezas doadoras e receptoras, gap, e outros.

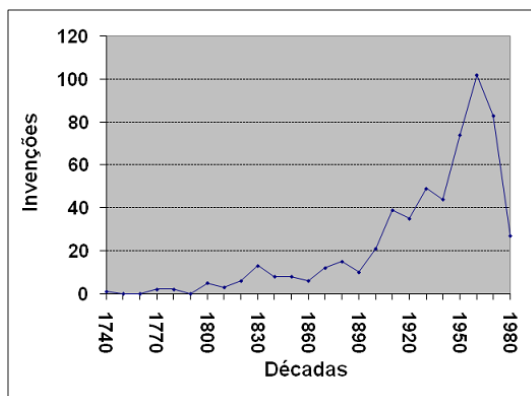


Figura 1: Número de invenções de dispositivos eletro-eletrônicos e descobertas. Dados extraídos do catálogo na Ref. [21]

A partir dessa invenção e com essa abordagem, desencadeou-se uma sucessão de inventos de novos sistemas mecânicos, constituídos de elétrons, inexistentes em a natureza, tendo por base os semicondutores e suas junções com impurezas específicas. Isto determinou o nascimento da indústria eletrônica de estado sólido. Uma estimativa do impacto desta invenção é apresentada na figura 1. Observa-se que o pico da curva acontece nas décadas de 1950 e 1960. Uma análise do registro dessas invenções, mostra que as mesmas estão fortemente associadas ao transistor de Bardeen e Brattain.

5.2. As mutações genéticas

O nascimento da biologia molecular é possivelmente uma das mais notáveis consequências da utilização de equações de movimento para analisar os fenômenos naturais. Considera-se como marco desse evento o trabalho de N. K. Timoféeff-Ressovsky, K. G. Zimmer e M. Delbrück [34]. Este trabalho, que ficou conhecido como o artigo dos três homens⁴⁰, teve grande influência na biologia, em especial no desenvolvimento da genética, com a sua contribuição

para o estabelecimento do gene como uma molécula e com a explicação em termos microscópicos (mecânicos) para o fenômeno das mutações genéticas. O gene foi mostrado posteriormente ser uma macromolécula com uma estrutura de dupla hélice [36].

O artigo de Timoféeff-Ressovsky, Zimmer e Delbrück é constituído de quatro partes. As três primeiras assinadas por cada um dos autores, nesta ordem, e a quarta parte assinada pelos três autores. Na terceira parte é onde Delbrück apresenta a proposta de modelagem em termos microscópicos mecânico-clássico-quântica da mutação genética. Procuramos, principalmente no texto de Delbrück, identificar então os elementos que evidenciam a intervenção das equações de movimento, em particular da equação de movimento de 1925, na explicação do fenômeno biológico, conhecido como mutação genética.

Delbrück inicia a sua parte do artigo⁴¹ discutindo a pertinência de introduzir-se conceitos da física-atômica na genética, tendo em vista a condição presente desta como uma ciência rigorosa, auto-suficiente, quantitativa e independente de qualquer sistema de medidas físicas. Explica que, enquanto a química e a física foram unidas pelo conceito de átomo⁴², a genética tem como unidade natural, para as suas análises quantitativas e numéricas, o organismo individual e como conceito fundamental a diferenciação dos traços de carácter, que não é traduzível facilmente em termos de um sistema de medidas físicas⁴³. Observa também a inexistência, até aquele momento, de qualquer conexão entre conceitos físicos e químicos e a genética, mesmo nas áreas da biologia onde o uso desses conceitos levaram a resultados interessantes. Ele salienta que se poderia, nestas circunstâncias, somente afirmar que a genética é autônoma e postular uma relação genérica desta com a física e a química⁴⁴.

A descrição dos fatos da genética em termos de conceitos físicos e químicos encontrou um esteio no desenvolvimento da pesquisa citológica na genética, que sugeria a identificação do gene com uma macromolécula⁴⁵. Em

⁴¹ Intitulado *Atomic-Physics Model of Gene Mutation*.

⁴² "... This unity is made manifest in the absolute measurement system that extends through all of their branches. On the other hand, we recognize as the foundation of this common measurement system the existence of rigid measuring rods and mechanically regular clocks. These are themselves possible only on the basis of atoms that are stable and that have properties persisting in time. ... : physics and chemistry, as quantitative sciences, rest upon the existence of stable atoms. ..." [34], p.255.

⁴³ "... Whereas in physics all measurements must in principle lead back to measurements of position and time, the fundamental concept in genetics – the differentiation of character traits – is unlikely to be expressed easily in absolute units of measurement in even a single case, much less in general. ..." [34], p. 255.

⁴⁴ "... they [the physical and chemical concepts] appear as only parts of processes when viewed biologically, and their relation to the whole life process remains problematic, unless their coordination is viewed as arising on the basis of some heuristic scheme in which the life process is postulated in principle as physical-chemical machinery." [34], p.255-256.

⁴⁵ "... the linking of genetics to cytological research proved that the gene, which was originally simply a symbolic representation of the differentiating unit, can be localized spatially and tracked in its movements. The sophisticated analysis of *Drosophila* has led to estimates of the gene's size, which are on the order of the largest distinctively structured molecules

⁴⁰ Ainda segundo Gribbin [35] (citando o artigo de N. Bohr, *Light and Life*, Nature, 131, 421 (1933)), Delbrück assistiu, e aparentemente impressionou-se, com a palestra de Bohr, em que este defendia ... Se fomos capazes de levar a análise dos mecanismos dos seres vivos tão longe quanto o foi a dos fenômenos atômicos, não temos que esperar vir a encontrar aspectos, que sejam diferentes dos das propriedades da matéria inorgânica.

genética, como observa Delbrück, em cada organismo existe um único tipo de gene-molécula, que de um ponto de vista químico encontra-se imerso em um ambiente bastante heterogêneo e a sua identidade com um gene de outro indivíduo é estabelecida, somente com base na similaridade dos seus efeitos desenvolvimentais. Para Delbrück, além dos detalhes revelados citologicamente a razão para a identificação dos genes com moléculas era a estabilidade destes, isto é, a capacidade de manterem-se inalterados frente a todas as influências do ambiente naturalmente ocorrendo nas células vivas, capacidade esta, que estaria conectada à estabilidade molecular. Então define um gene-molécula como um bem definido conjunto de átomos⁴⁶. No final da introdução ele observa, que a versão molecular proposta para o gene, não especifica uma estrutura atômica detalhada para este conjunto de átomos, mas é suficiente para os propósitos do trabalho e que a propriedade fundamental do gene (sua auto-replicação na mitose) é uma propriedade conjunta do gene com a matéria da sua vizinhança e não pode ser testada sem a inclusão da interação entre estes.

Para explicar as mutações genéticas, supondo ser o gene uma macromolécula, cuja estrutura, composição e propriedades físico-químicas ainda eram desconhecidas, uma primeira abordagem seria investigar a existência de concordância entre o tipo e limite da estabilidade dos genes com o que a nova física dos átomos preveria sobre isso para as macromoléculas⁴⁷. Assim Delbrück inicia a proposição do seu modelo para as mutações, analisando de acordo com a mecânica quântica⁴⁸, as mudanças, e as condições para a ocorrência destas, que poderiam acontecer em macromoléculas⁴⁹. Ao supor que os genes eram nada mais que macromoléculas, isto é, sistemas compostos de átomos, por sua vez compostos de núcleos positivos e elétrons, quaisquer propriedades ou mudanças destes sistemas deveriam ser descritas, em princípio, a partir das soluções da equação de movimento do hamiltoniano da macromolécula⁵⁰, H_{Mol} , ou de aproximações deste e de suas interações com fótons

e elétrons⁵¹. Quaisquer mudanças no gene seriam sempre o resultado de transições entre os possíveis estados de movimento de H_{Mol} , que Delbrück chama de processos elementares⁵². Caberia escolher, dentre os possíveis processos, quais os que poderiam produzir a nova macromolécula mutante, isto é, o gene mutante, e então lista e discute um conjunto de processos possíveis⁵³. O primeiro refere-se a transições entre estados vibracionais de H_{Mol} , que não alteram as posições centrais de cada um dos átomos na molécula, não produzem rearranjos dos átomos na molécula e são descartados⁵⁴. O segundo refere-se à excitações eletrônicas⁵⁵: se produzidas por interação com fótons ou elétrons poderiam ser revertidas com emissão de radiação ou excitação vibracional, ou produzir um rearranjo dos átomos na molécula, levando-a a uma nova configuração estável.

A possibilidade de rearranjo dos átomos na macromolécula em um novo estado de equilíbrio é analisada em seguida e é subdividida em dois tipos: se através de flutuações estocásticas dos modos vibracionais ou através de excitação eletrônica, oriunda da interação do sistema com fótons ou elétrons e que em geral requer uma energia maior que a energia do movimento térmico. No primeiro tipo, Delbrück observa que qualquer limite de estabilidade, isto é, uma barreira de potencial limitando um possível rearranjo dos átomos, é muito maior que a energia térmica média por grau de liberdade vibracional, mas ainda assim pode ser ultrapassado e discute a probabilidade de acontecimento destes eventos estocásticos com argumentos da mecânica estatística clássica. No segundo tipo, argumenta que a macromolécula é levada a um estado eletrônico excitado por interação com fótons ou elétrons e que a energia adquirida neste processo pode ser transferida para movimento dos núcleos dos átomos

known to us. Based on this result, many researchers see the gene as nothing more than a special type of molecule whose structure is simply not yet known in detail" [34], p. 256.

⁴⁶ "... well-defined assemblage of atoms, according to which we assume that the identity of two genes lies in the fact that the same atoms are stably arranged in them in the same fixed way. The stability of the configuration must be especially high compared to the chemical excitations occurring naturally in living cells; genes can take part in general metabolism only catalytically. ..." [34], p. 256.

⁴⁷ "... We must first investigate the type and limit of the stability of the genes and see whether there is agreement with what we know from atomic theory about well-defined assemblages of atoms. ..." [34], p. 257.

⁴⁸ Na análise da possibilidade de rearranjos dos átomos no gene-molécula através de flutuações estocásticas, que explicaria as mutações espontâneas, Delbrück utiliza elementos da mecânica estatística clássica, a distribuição de Boltzman (ver.Eq. 1, p. 258 na Ref. [34]), para determinar a probabilidade termodinâmica de ocorrência de modos vibracionais que permitiriam a superação das barreiras de potencial que dificultam os rearranjos dos átomos na macromolécula ou alguma dissociação.

⁴⁹ "... We will first review the kinds of change that can occur in an assemblage of atoms, as well as in detail the conditions of their occurrence, and then turn to a comparison with mutations. ..." [34], p.257.

⁵⁰ A equação de movimento, seja clássica ou quântica, é definida pelo hamiltoniano do sistema [37].

⁵¹ As análises de Delbrück são qualitativas, baseadas nos princípios das mecânicas clássica e quântica e em resultados experimentais. Em sendo um problema de muitos corpos não se tem métodos gerais para integrar as equações de movimento, sejam clássicas ou quânticas. São necessários métodos numéricos, conjugados com esquemas aproximativos diversos, com alto custo computacional em geral, mesmo para sistemas com muito menor número de átomos que estas macromoléculas. A determinação destas soluções é ainda mais complicada quando envolve interação da molécula com fótons e elétrons.

⁵² "... In our gene model, we assume that the atoms in the assemblage have determinate central locations and that the electrons are in determinate states. With these stipulations, we find that changes to the model can occur only in jumps. They must thus consist of a sequence of elementary processes." [34], p.257.

⁵³ "An assemblage of atoms is capable of the following modifications through elementary processes: a. Changes in the states of vibration: ... ; b. Changes of the electron states through excitations of one or more electrons: ... c. Rearrangement of the atoms in another equilibrium state: $c(\alpha)$. Through fluctuations in the thermal energy. ... $c(\beta)$. Delivery of energy to an electron from outside." [34], pp. 257-260.

⁵⁴ "... thus no molecule is stable in this respect. But the chemical character does not change with the state of vibration. From the outset, then, the state of vibration may not be incorporated into the definition of the assemblage of atoms." [34], pp. 257-258.

⁵⁵ Estritamente falando não existem estados de movimento dos núcleos e dos elétrons em separado. Estes movimentos obviamente são correlacionados. Existem estados de H_{Mol} . Devido à dificuldade de resolver a equação de movimento para os núcleos atômicos e elétrons conjuntamente, mesmo para as menores moléculas, foram introduzidos métodos de separação dos movimentos eletrônico e nuclear e junto uma linguagem específica, com termos como, orbitais eletrônicos, nucleares, etc.

da macromolécula e provocar o rearranjo destes em outras locações. Em havendo um rearranjo, por qualquer que seja a via, o gene transformar-se-ia numa nova macromolécula, o gene mutante.

Após identificar os processos que poderiam levar átomos a adquirirem uma energia igual ou maior à uma energia de ativação e assim superar um limite de estabilidade⁵⁶, Delbrück prossegue testando seu modelo buscando verificar até onde o mesmo poderia explicar o fenômeno das mutações. E com detalhadas análises envolvendo seleção natural, mecânica estatística e interação de fótons com o sistema molecular, ele mostra que o comportamento das taxas de reação (as taxas de mutação) previstas pelo seu modelo de gene-molécula, tanto para as mutações espontâneas como para as mutações induzidas por radiação, estavam em concordância com os resultados experimentais⁵⁷. Estabelece então que no escopo do seu modelo as mutações são resultado de um único processo elementar⁵⁸.

Na parte 4 do artigo, os três autores reafirmam as hipóteses e os resultados da parte 3⁵⁹, enfatizam o papel da mecânica quântica na explicação das mutações genéticas⁶⁰ e esboçam uma discussão sobre a estrutura do gene⁶¹.

⁵⁶ “A particular rearrangement can be therefore arise in basically two ways: either through random accumulation of thermal energy, or through dissipation of excitation energy from an electron.” [34], p. 260.

⁵⁷ Ver as páginas 261-264 da Ref. [34].

⁵⁸ “A mutation consists of a rearrangement of a stable assemblage of atoms, according to our model, and this rearrangement results, from an elementary process. The latter refinement is compelled by the frequently observed similarity between forward and back mutation.” [34], p. 262.

⁵⁹ “A mutation is produced by an external infusion of energy or a fluctuation of thermal energy . . . , and consists of a rearrangement of atoms into a new equilibrium configuration within a larger assemblage of atoms. . . ‘Spontaneous’ mutations are produced through random thermal fluctuations; the probability of crossing the threshold for the reaction to occur depends on the structure of the corresponding assemblage of atoms (the corresponding allele), and this accounts for the variety in the spontaneous rates of different individual genes.” [34], p.265.

⁶⁰ “The idea that a mutation is an individual elementary process in the sense of quantum theory is thus suitable for giving an account of the spontaneous as well as radiation-induced mutation processes. More specifically we can expect that further analysis of radiation mutation processes will show close parallels to photochemistry. . . in a mutation experiment, the use of such radiation (monochromatic ultraviolet) should be well suited for singling out specific groups of mutations that can be triggered by absorption of only specific wavelengths. . . we can readily assure ourselves that the ordinary transition probabilities of electron transitions are large enough that we can expect a measurable yield of mutations through the use of ordinary light quanta.” [34], p. 266.

⁶¹ “A mutation consists of a rearrangement or dissociation of a bond within an assemblage of atoms One can easily picture the gene as this assemblage of atoms. Accordingly, that physical-chemical unit (assemblage of atoms) in which the mutation process can occur would represent the structure of the entire. This picture emerges entirely naturally from the facts and considerations presented here, and satisfies the requirement from genetics that the gene be conceived of as a unit, largely autonomous in its behavior and normally incapable of further division.” [34], p. 267.

6. ASPECTOS METODOLÓGICOS DO ESQUEMA QUÂNTICO

A estrutura da mecânica quântica é similar à da mecânica clássica; isto é, os aspectos cinemáticos e dinâmicos ainda permanecem como descritos nos itens a-d, na seção 1. Alguns aspectos novos, contudo, aparecem na teoria, necessários à descrição do movimento das partículas subatômicas. Estes implementos são de fato uma acomodação da mecânica com um conceito de escala de pequeno absoluto, caracterizada através da constante de Planck. Assim os estados do sistema passam a ser descritos por amplitudes de probabilidade de mensuração das variáveis cinemáticas. Entretanto, deve ser ressaltado que a estrutura dinâmica (a relação causal) permanece a mesma. Com os pressupostos da mecânica quântica, os sistemas atômicos são em geral tratados como constituídos de partículas, sendo que o movimento fica estabelecido a partir do cálculo dessas amplitudes de probabilidades. Deve-se salientar que dois conceitos fundamentais na mecânica quântica de 1925, quais sejam, estados estacionários e estado fundamental, foram introduzidos por Bohr em seus trabalhos de 1913, para justificar a estabilidade da matéria.

Se para sistemas mecânicos clássicos, as tentativas de tratá-los intuitiva e empiricamente foram substituídas pelo esquema Newtoniano, tanto devido as novas possibilidades, como pelas dificuldades da intuição e do empirismo, no caso dos sistemas mecânicos constituídos de partículas subatômicas, estas questões tornam-se mais radicais. Neste caso, a própria imagem clássica fica ainda mais distante, até por falta de análogos para serem usados como guia. Ou seja, a visualização do movimento dos sistemas mecânicos no espaço tridimensional não é possível, mesmo para aqueles mais elementares. Ressalte-se a exigência de novas variáveis dinâmicas para a construção da cinemática quântica (como o spin, isospin, cor, etc.); variáveis estas desnecessárias na cinemática dos objetos macroscópicos. Assim, o papel das imagens clássicas, mais ou menos intuitivas, é drasticamente reduzido. No entanto, tal fato não se constitui em nenhum impedimento para o estudo mecânico-quântico dos fenômenos. Neste contexto, observa Dirac,

O principal objeto da ciência não é prover imagens, mas é a formulação de leis governando os fenômenos, e a aplicação destas para descobrir novos outros fenômenos. Se uma imagem existe, tanto melhor; mas se uma imagem existe ou não é uma questão de importância secundária. No caso dos fenômenos atômicos, nenhuma imagem pode ser esperada no sentido usual da palavra imagem, pela qual entendemos um modelo funcionando essencialmente em bases clássicas [Newtonianas]. Pode-se, não obstante, entender o significado da palavra para incluir qualquer forma de olhar para as leis fundamentais que torne sua auto-consistência óbvia. Com esta extensão, pode-se formar gradualmente uma imagem dos fenômenos atômicos, adquirindo-se familiaridade

*com as leis da teoria quântica.*⁶²

Esta observação de Dirac acentua a importância do viés matemático, expresso através das equações de movimento, como método de abordagem dos sistemas atômicos, sem contudo retirar o caráter mecânico-Newtoniano de análise da natureza. Assim a descoberta ou o conhecimento de qualquer ente em a natureza (e a apropriação tecnológica deste), só se dá de modo pleno quando se estabelece um conjunto de variáveis dinâmicas suficiente para determinar univocamente a sua cinemática. Este é o procedimento geral para declarar-se a descoberta de uma partícula elementar⁶³.

O que representou o estabelecimento das equações de movimento da mecânica Newtoniana para as engenharias clássicas, guarda semelhança com o que tem representado a equação de movimento de Heisenberg-Dirac-Schrödinger para as novas engenharias. A familiaridade e consequente imagem dos fenômenos no nível atômico vem sendo desenvolvida desde a proposição da equação de 1925, e podemos dizer, em resumo, que vivemos desde então a era das engenharias dos sistemas mecânicos compostos de partículas de massa pequena sob interação eletromagnética⁶⁴. Isto compreende todos os sistemas constituídos de prótons e elétrons cujos movimentos são regidos pelas equações básicas da mecânica quântica.

Devemos observar que, logo após o estabelecimento da mecânica quântica, iniciou-se a busca da adequação da teoria para sistemas atômicos com velocidades altas; isto é, a procura da mecânica quântica relativística. O primeiro sucesso neste sentido dá-se com a proposição da equação de movimento relativística para o elétron – a equação de Dirac, que levou à previsão da antipartícula do elétron, o pósitron. Este é considerado o marco inaugural da atual física de partículas elementares.

7. OBSERVAÇÕES FINAIS

Neste ensaio analisamos a relevância da ciência da mecânica para o desenvolvimento das técnicas e das ciências naturais em geral, com o pressuposto de que todos os fenômenos naturais são manifestações do movimento. Como elemento do método de análise, discutimos alguns problemas abordados pela via mecânica e fizemos um estudo de aspectos metodológicos das mecânicas clássica e quântica. Depreende-se deste procedimento, o impacto estratégico

da mecânica sobre o desenvolvimento das técnicas e as implicações na formulação das ciências fenomenológicas.

Desde antes da mecânica, ao longo da história, o poder busca ter ao seu alcance o saber. Assim foi Aristóteles tutor de Alexandre, Arquimedes em Siracusa, Napoleão e a Escola Politécnica de Paris, e tantos outros exemplos. Estas são mostras da importância do saber, e em particular das atividades científicas. No âmbito da física, dentre um sem-número de exemplos enquanto investimento estratégico, destaca-se a criação do CERN o laboratório europeu de pesquisa em física de partículas elementares em altas energias. A idéia de um laboratório europeu de grande porte foi proposta inicialmente por De Broglie, na Conferência Cultural Européia de Lausane, Suíça, em 1949. A proposta acompanhava a tendência histórica do período moderno, acentuada com o pós-guerra, em reconhecer a posição de destaque dos métodos da física, as mecânicas e suas equações de movimento, como um fundamento das tecnologias e um empreendimento básico para a organização das sociedades contemporâneas. De um ponto de vista geopolítico, a proposta de De Broglie inseria-se no contexto das políticas de pacificação do território europeu; uma das medidas que pode ser vista como precursora da União Européia. Atualmente, o CERN é o maior laboratório na área, envolvendo os países europeus e outros convidados. Milhares de pesquisadores trabalham em projetos que excluem, regimentalmente, aplicações militares e comerciais, além de considerar de domínio público todo o resultado obtido. A importância da atividade de pesquisa científica de vanguarda, como reforçada pelos físicos europeus na década de 1950, encontra um importante exemplo em um dos subprodutos da pesquisa do CERN: a criação da WWW (World Wide Web), na década de 1970. Por outro lado, quando a oportunidade técnico/científica é perdida, o efeito pode ser incalculável. Remetendo-nos a estudos detalhados [39], vale citar a imensa oportunidade histórica que surgiu com a invenção do avião por Santos Dumont; oportunidade praticamente abandonada em seu início pelo Brasil.

Por fim, considerando o contexto econômico e geopolítico atual, vale ressaltar a importância da ciência da mecânica bem expressada por Tegmark e Whiller, que apontavam, já no ano 2000, que 30% do PIB dos Estados Unidos provinham dos inventos e descobertas da mecânica quântica [40]. Outro destaque é a percepção do grande capital americano quanto à importância da ciência para a manutenção da hegemonia política dos Estados Unidos na geopolítica global, manifestada em matéria publicada no jornal *The Washington Post*, de 2 de maio de 1995, e assinada por dezesseis presidentes de empresas americanas de grande porte e de alta tecnologia, incluindo IBM, General Electric, McDonnell Douglas, Motorola, Chrysler, DuPont, dentre outras⁶⁵. Essa matêamericano sobre o corte no orçamento da pesquisa

⁶² Tradução dos autores. Ver a Ref. [38].

⁶³ Por exemplo, o que se chama descoberta do eletron é neste sentido um conjunto de experimentos que começou quando se mostrou serem os raios catódicos entes que se propagavam em linha reta, podendo assim estar em bem definidos estados translacionais, passando pela determinação de suas características de massa e carga elétrica (Plücker-1858, Hittorf - 1869, Thomson - 1894, Kaufmann - 1897, Ehrenhaft - 1909, Millikan - 1910; Veja Max Born, *Atomic Physics*, 8th.ed. Blackie & Son Ltd) sendo finalizada com a introdução da sua variável dinâmica de spin por Pauli em 1925.

⁶⁴ Algumas realizações tecnológicas no século XX envolvem partículas subatômicas que interagem via a força nuclear forte, como por exemplo, os reatores e armas nucleares.

⁶⁵ Liderança tecnológica, por sua própria natureza, é efêmera. Em algum ponto da sua história, todas as grandes civilizações - o Egito a China, a Grécia, Roma - tiveram em suas mãos "o domínio da arte" temporariamente. Cada uma dessas civilizações deixou escapar esta vantagem entre seus dedos e abrindo mão da liderança tecnológica, perdeu também a liderança política internacional. [41]

básica nas universidades americanas. O documento discorre sobre a importância dessa pesquisa básica universitária para o desenvolvimento científico e tecnológico, a qual tem em geral períodos longos de gestação antes de transformar-se em aplicações⁶⁶, e observa o papel central do financiamento público dessa pesquisa, referido ali como capital realmente paciente⁶⁷. O documento é finalizado com a defesa explícita e contundente da manutenção deste financiamento público da pesquisa básica, enquanto elemento estratégico fundamental na definição da liderança americana para o novo milênio, considerando que foram os elementos associados a produção do saber quem definiu a hegemonia cultural e econômica daquele país no século XX⁶⁸.

O indicador econômico apontado por Tegmark e Whiller e a carta dos industriais americanos são a materialização, enquanto significado aplicado, da análise que conduzimos neste trabalho sobre a importância da ciência da mecânica para o desenvolvimento das ciências e das técnicas.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer a Cristiane Hanschild, do Instituto Goethe, Brasil-Alemanha, Salvador-Bahia, que localizou a versão em inglês da Ref.[34], publicada em 2011, quando dela solicitamos, no mesmo ano de 2011, uma tradução desta referência; a Adolfo Malbouisson (CBPF) e a Henrique Lins de Barros (CBPF) pelo interesse neste trabalho e pela leitura do manuscrito; ao CNPq, devido ao apoio financeiro.

⁶⁶ Por exemplo o tempo transcorrido para a descoberta do elétron, ou as mudanças nos conceitos de espaço e tempo até chegarmos à curvatura do espaço-tempo, antes de serem produzidos o transistor, o laser, o GPS etc.

⁶⁷ A História demonstrou que são os recursos federais que financiam a pesquisa que depende de capital realmente 'paciente', necessário para desenvolver pesquisa básica e criar condições de se assumir riscos maiores, o que é imprescindível para descobertas tecnológicas. Muitas vezes estes avanços não têm utilidade imediata, mas abrem "janelas tecnológicas" que permitem avançar nas pesquisas até que surja uma aplicação viável.[41]

⁶⁸ Daremos sustentação a **essa** especial comunidade científica que fez deste o "século americano"? Ou seguiremos pelo mesmo caminho trilhado por outras grandes civilizações e cederemos nossa liderança a nações mais audaciosas e confiantes nas suas próprias forças? No momento em que o Congresso toma suas decisões a respeito da pesquisa universitária, não incorramos em nenhum erro: Estamos determinando o que será o século 21 agora. [41]

- [1] M. C. Nahan, *Selections from Early Greek Philosophy* (Appleton-Cebtury-Crofts, N. York, 1964).
- [2] R.S. Cohen, *Prelude to Galileo: Essays on Medieval and Sixteenth-Century Sources of the Galileo's Thought* (Kluwer, Boston, 1981).
- [3] F. C. Khanna, A. P. C. Malbouisson, J. M. C. Malbouisson, A. E. Santana, *Thermal Quantum Field Theory: Algebraic Aspects and Applications* (W. Scientific, Singapore, 2009).
- [4] E. Mach, *The Science of Mechanics* (Open Court Classics, La Salle-Illinois, 1960).
- [5] C.L. Siegel, J.K. Moser, *Lectures on Celestial Mechanics* (Springer-Verlag, Berlin, 1971).
- [6] Um esboço sobre algumas idéias abordadas aqui foi publicado em: L. A. C. Malbouisson e A.E. Santana, *Equações de Movimento e as Tecnologias*, Folha da Física – Boletim Informativo do Instituto de Física da UFBA, www.fis.ufba.br, número 8, 2003, p. 1.
- [7] U.-J. Le Verrier, *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)*, 10 Novembre 1845, T. XXI, 1845, p. 1050.
- [8] U.-J. Le Verrier, *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)*, 1 Juin 1846, T. XXII, 1846, p. 907.
- [9] U.-J. Le Verrier, *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)*, 31 Août 1846, T. XXIII, 1846, p. 428.
- [10] T. J. J. See, *Popular Astronomy*, **18**, 475 (1910).
- [11] Account of the Discovery of the Planet of Le Verrier at Berlin in *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Abstracts of Papers and Reports of the Proceeding of the Society*, from November, 1845 to June 1847, Vol. VII, 1847, London. p. 153.
- [12] *Ibidem*, pp. 154-157.
- [13] J. C. Adams, On the perturbations of the Uranus, in: *Appendices of the Various Nautical Almanacs*, between 1834 and 1854, p. 265, London.
- [14] Account of the Discovery of the Planet of Le Verrier at Berlin in *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Abstracts of Papers and Reports of the Proceeding of the Society*, from November, 1845 to June 1847, Vol. VII, 1847, London. p. 121-144.
- [15] Le Verrier, Urbain J. “Recherches sur l'orbite de Mercure et sur ses perturbations. Détermination de la masse de Vénus et du diamètre du Soleil”. *Journal de mathématiques pures et appliquées 1re série*, tome 8 (1843), pp. 273-359.
- [16] Le Verrier, Urbain J. “Theorie du mouvement de Mercure”. *Annales de l'Observatoire Impérial de Paris; Recherches Astronomiques*, Chapitre XV, Tome 5, Mallet-Bachelier, Paris, 1859.
- [17] U.-J. Le Verrier, *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)* **49**, 379 (1859).
- [18] S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology* (John Wiley, N. York, 1972).
- [19] H. Ziegler, *Mechanics*, vol II (Adson-Wesley, Massachusetts, 1965).
- [20] I. Newton, *The Principia*, Translated by A. Motte (Prometheus Book, N. York, 1995).
- [21] G.W.A. Dummer, *Electronic Inventions and Discoveries* (IoP, London, 1997).
- [22] A.C. Guyton, *Tratado de fisiologia médica* (Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 1989).
- [23] I. Newton, *Optics*, in: *Great Books of the Western World*, Ed. R. M. Hutchins, vol. 34 (Enc. Britannica, London, 1952)
- [24] E.N. Lorenz, *Atmospheric models as dynamical systems*, in *Perspectives in Nonlinear dynamics*, Eds. M.F. Shlesinger, R. Cawley, A.W. Saeuz, W. Zachary (W. Scientific, Singapore, 1986).
- [25] H. B. Callen, *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics* (J. Wiley, N. York, 1985).
- [26] W. F. Wreszinski, *Termodinâmica* (Edusp, São Paulo, 2002).
- [27] T. Hiosrige, *Origins of the Lorentz' Theory of Electron and the Concept of the Electromagnetic Field*, *Historical Studies in the Physical Sciences*, **1**, 151 (1969) (ver em: www.jstor.org/stable/27757298).
- [28] G.N. Lewis, *J. Amer. Chem. Soc.* **38**, 762 (1916).
- [29] I. Langmuir, *J. Amer. Chem. Soc.* **41**, 868 (1919).
- [30] S. Rajasekar, Ludwig Edward Boltzmann, [arXiv:physics/0609047v1\[physics.hist-ph\]](https://arxiv.org/abs/physics/0609047v1), 2006.
- [31] *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **7**, 1 (1847), *Abstracts of Papers and Reports of the Proceeding of the Society*, from November, 1845 to June, 1847.
- [32] J. Bardeen, W.H. Brattain, *Phys. Rev.* **75**, 1208 (1949). Ver também a Ref. [21], p. 120, para uma descrição da importância de W. Shockler no processo.

- [33] J. Millan, *Vacuum-tube and Semiconductor Electronics* (McGraw-Hill, Toronto, 1958).
- [34] N. W. Timoféeff-Ressovsky, K.G. Zimmer, M. Delbrück, *Über die natur der genmutation und der genstruktur*, Nachrichten der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Math.-Phys. Klasse. Fachgruppe (Biologie) 6, 189 (1935). A tradução para o Inglês encontra-se em: *Creating a Physical Biology: The Three-Man Paper and Early Molecular Biology*, Edited by Phillip R. Sloan and Brandon Fogel (The University of Chicago Press, Chicago, 2011).
- [35] J. Gribbin, *À procura da dupla hélice: a física quântica e a vida* (Editorial Presença, Lisboa, 1985).
- [36] J.D. Watson, F.H.C. Crick, A structure for deoxyribonucleic acid, *Nature* 171, 737 (1953).
- [37] R. McWeeny, *Methods of Molecular Quantum Mechanics* (Academic Press, N. York, 1992).
- [38] P.A.M. Dirac, *The principles of quantum mechanics* (Oxford, London, 1967).
- [39] H. Lins de Barros and M. Lins de Barros, Changes in the concepts of flight in the first decade of the 20th. century: The pioneering work of Alberto Santos-Dumont, in *Proceedings of the XX International Congress of History of Science (Liège, 20-26 July, 1997) – Volume VII –Technology and Engineering, BREPOLs*.
- [40] M. Tegmark and J. A. Wheeler, 100 Years of Quantum Mystery, *Scientific American*, February 2001, p. 69.
- [41] W. Wayne Aleen, et al., A Hora da Verdade para os Estados Unidos, matéria paga publicada no *The Washington Post*, 02 de maio de 1995, www.washingtonpost.com (reproduzido pela American Association for the Advancement of Science, www.aaas.org).

Pedidos de cópias desta publicação devem ser enviados aos autores ou ao:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Área de Publicações
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4^o andar
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ
Brasil
E-mail: socorro@cbpf.br/valeria@cbpf.br
http://www.biblioteca.cbpf.br/index_2.html

Requests for copies of these reports should be addressed to:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Área de Publicações
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4^o andar
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ
Brazil
E-mail: socorro@cbpf.br/valeria@cbpf.br
http://www.biblioteca.cbpf.br/index_2.html