

A FÍSICA DE HELMHOLTZ E SUAS BASES FILOSÓFICAS

OSVALDO MELO SOUZA FILHO

RESUMO: Após uma curta biografia de Hermann von Helmholtz, discutimos a célebre monografia de 1847, onde ele propõe a conservação da energia. Nessa análise, procuramos explicar de que modo esse artigo relacionava-se ao programa, desenvolvido posteriormente por Helmholtz e onde ele procurava fundamentar a mecânica clássica empregando a perspectiva da mecânica analítica. À guisa de conclusão, nós sugerimos que, ao final de sua vida, Helmholtz não mais acreditava integralmente no seu trabalho de 1847, aproximando-se da posição científico-epistemológica de Duhem.

ABSTRACT: After a short biography of Herman von Helmholtz we discuss his famous article of 1847 where he introduced the principle of energy conservation. In this analysis, we clarify how this work corresponds to Helmholtz's later "research program", where he defended a new basis for classical mechanics: this new basis was analytical mechanics. As conclusion, we suggest that, at the end of his life, Helmholtz gave up some ideas of his own work of 1847 and adopted some conceptions due to Duhem.

1. Breve Biografia: sua formação, a influência paterna e uma apreciação geral sobre o seu programa para a física teórica.
2. O "Sobre a Conservação da Força" de 1847: forte influência kantiana e os germes do programa helmholtziano para a física teórica baseado no formalismo da Mecânica Analítica.
3. Alguns dos trabalhos mais representativos da física de Helmholtz: Hidrodinâmica (1858-68), Eletromagnetismo (1870-81), Termodinâmica (1882), Mecânica Analítica e Termodinâmica [Estática dos Sistemas Monocíclicos] (1884), Princípios da Mínima Ação (1884-92).

Cronologia dos principais trabalhos em Física de Helmholtz e de sua carreira científica: (baseado em Koenigsberger, 1965)

Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (n. 31 de agosto de 1821, Potsdam; m. 8 de setembro de 1894)

Estudante no Instituto Real Friedrich-Wilhelm para Medicina e Cirurgia em Berlim, 1838-1842.

Cirurgião no Charité, 1842-1843.

Cirurgião do Exército Prussiano em Potsdam, 1843-1848.

* 1847 "Sobre a Conservação da Força". (Sociedade Física de Berlim) publicado por G. Reimer (Berlim). (p.39).

Conferencista da Academia de Artes, e Assistente do Museu de Anatomia em Berlim, 1848-1849.

1849 "Princípios de Construção de um Galvanômetro Tangente". (Sociedade Física de Berlim). (p.59).

Professor de Fisiologia em Königsberg, 1849-1855.

1851 "Sobre a duração e sentido de Correntes Elétricas induzidas pela variação de uma Corrente Indutora". Berl. Monatsber., Poggend. Annal., LXXXIII. (p.79)

- 1852 "Um Teorema da distribuição de Correntes Elétricas em Materiais Condutores". Berl. Monatsber. (p.99).
- 1853 "Sobre algumas Leis de distribuição de Correntes Elétricas em Materiais Condutores com aplicação em experimentos em Eletricidade Animal". Poggend. Annal., LXXXIX. (p.99).
- * 1854 "Resposta às observações do Dr. Clausius". Poggend. Annal., XCI. (p.115).
- 1855 "Sobre a Composição de Cores Espectrais". Poggend. Annal., XCIV. (p.131).
- Professor de Fisiologia e Anatomia em Bonn, 1855-1858.
- * 1858 "Sobre as Integrais das Equações Hidrodinâmicas que representam o Movimento de Vórtice". Journal de Crelle, LV, (trad.) Phil. Mag. [4], XXXIII. (p.167).
- "Sobre o Movimento mais Geral de um Fluido". "Sobre o Movimento dos Fluidos". "Resposta à nota de M. J. Bertrand de 19 de outubro de 1868". Comptes Rendus. (p.170).
- Professor de Fisiologia em Heidelberg, 1858-1871.
- 1859 "Sobre as Vibrações Sonoras em Tubos com extremos abertos". Journal de Crelle, LVII. (p.180).
- 1860 "Sobre a Fricção em Líquidos". Akad. d. Wissensch., Viena. (p.186).
- "Sobre o Movimento das Cordas de um Violino". Proc. Phil. Soc., Glasgow. (p.196).
- 1861 "Sobre a Aplicação da Lei de Conservação da Força à Natureza Orgânica". Proc. Roy. Inst., III. (p.199).
- "Contribuição à Teoria de Reed-pipes". Pogg. Annal., CXIV. (p.205).
- Sobre um Método Geral de Transformação de Problemas relativos à Distribuição Elétrica". Heidelberg, Dec. 8. (p.206).
- * 1868 "Sobre os Movimentos Descontínuos dos Fluidos". Monatsber., Berlin.
- "Contribuição à Teoria de Correntes Estacionárias em Fluidos Viscosos". Lecture, Heidelberg.
- * 1869 "Sobre as Oscilações Elétricas". Sociedade Heidelberg. (p.268).
- * 1870 "Sobre as Leis de Correntes Elétricas Variáveis em Materiais Condutores". Sociedade Heidelberg. (p.269).
- "Sobre a Teoria da Eletrodinâmica. Parte I: Sobre as Equações de Movimento da Eletricidade para Corpos Condutores em Repouso". Crelle's Journ., LXXII. (p.269).
- Professor de Física em Berlim, 1871-1888.
- * 1871 "Sobre a Razão de Transmissão dos Efeitos Eletrodinâmicos". Academia de Berlim. (p.282).
- * 1872 "Sobre a Teoria da Eletrodinâmica". Academia de Berlim. (p.288).
- * 1873 "Sobre a Teoria da Eletrodinâmica. Parte II: Notas Críticas". Crelle's Journ., LXXV. (p.289).
- * 1874 "Sobre a Teoria da Eletrodinâmica. Parte III: Forças Eletrodinâmicas em Condutores em Movimento". Crelle's Journ., LXXVIII. (p.289).
- * 1877 "Sobre Correntes Galvânicas produzidas por diferenças na Concentração: Deduções da Teoria Mecânica do Calor". Wiedemann's Ann., III. (p.309).
- * 1879 "Estudos sobre as Camadas Limite Elétricas". Wiedemann's Ann., VII. (p.317).
- * 1880 "Sobre as Correntes de Movimento sobre a Platina Polarizada". Wiedemann's Ann., XI. (p.323).
- * 1881 "Sobre as Forças atuando no interior de Corpos Polarizados Dielectricamente ou Magneticamente". Wiedemann's Ann., XIII. (p.329).
- * 1882 "A Termodinâmica dos Processos Químicos". Academia de Berlim. (p.335).

- * 1884 "Estudos sobre a Estática dos Sistemas Monocíclicos". Academia de Berlim. (p.349).
 "Generalização dos Teoremas sobre a Estática dos Sistemas Monocíclicos". Academia de Berlim.
 (p.350).
 Princípios da Estática dos Sistemas Monocíclicos". Crelle's Journ., XCVII. (p.350).
 - * 1884 Sobre o significado Físico do Princípio da Mínima Ação". Crelle's Journ., C. (p.350).
 Presidente do Instituto Físico-Técnico Imperial (Reichsanstalt), Charlottenburg, 1888-1894.
 - * 1892 "O Princípio da Mínima Ação em Eletrodinâmica". Academia de Berlim. (p.401).
- (obs.: As páginas se referem ao livro de Koenigsberger).

Breve Biografia

Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz nasceu em Potsdam em 1821. Foi educado no Potsdam Gymnasium, entre os anos 1832 e 1838. O pai, August Ferdinand Julius Helmholtz, foi professor de Filosofia e Literatura Clássica do mesmo Potsdam Gymnasium, exercendo uma forte influência na formação do filho.

August Helmholtz foi amigo de muitos anos de Imanuel Hermann Fichte (Koenigsberger, 1965, p.5), professor de filosofia e filho do "Naturphilosoph" Gottlieb Fichte. Em sua autobiografia, Helmholtz (1895, p.285) comenta que o seu interesse desde jovem por questões da teoria da cognição foi despertado por presenciar, inúmeras vezes, as disputas filosóficas entre o pai, influenciado pelo idealismo de Fichte, e os amigos dele que defendiam os pontos de vista de Kant ou Hegel. Pode-se suspeitar, da natureza de tais discussões filosóficas, permeadas do espírito especulativo da *Naturphilosophie* (ver Gower, 1973), que Helmholtz, talvez, tenha delas adquirido um certo gosto em buscar grandes generalizações. Cabe-nos salientar, todavia, que a influência filosófica fundamental recebida por Helmholtz é proveniente, sobretudo do pensamento de Kant (ver Heimann, 1974 e Fullinwider, 1990). Essa influência, em que pese um crescente empirismo¹ (ver Richards, 1977), irá nortear a sua carreira científica e nela imprimir uma atitude extremamente crítica às especulações metafísicas e mais voltada à consideração rigorosa dos fatos.

De sua autobiografia podemos apreciar como Helmholtz (1895, p.271-2) foi estimulado pelo pai na leitura dos clássicos da literatura, porém já demonstrava desde cedo um forte interesse pela física e muita facilidade ao lidar com a geometria. No entanto, tendo a sua família limitados recursos, foi levado a ingressar no Instituto de Medicina e Cirurgia Friedrich-Wilhelm de Berlim em 1838.

Durante o período de graduação neste Instituto, Helmholtz inclinou-se, com o incentivo de seu professor Johannes Peter Müller, aos estudos de Fisiologia e, sobretudo, na busca de uma explicação físico-química para os processos biológicos. Esta relação entre Fisiologia, Física e Química e consequentemente a quantificação dos processos biológicos, mantiveram Helmholtz em um permanente estudo da Física e da Matemática. Assim os princípios da Mecânica foram estudados por Helmholtz nos trabalhos de Euler, Daniel Bernoulli, D'Alembert e Lagrange, conforme é apontado pelo seu biógrafo (Koenigsberger, 1965, p.25-26) e por sua autobiografia de 1891 (Helmholtz, 1895, p.276).

Em junho de 1842, Helmholtz conclui os exames e em novembro do mesmo ano obtém o título de doutor com a apresentação da tese intitulada "De Fabrica Systematis Nervosi Evertibratorum" (A Estrutura do Sistema Nervoso em Invertebrados).

Depois de formado em Medicina, Helmholtz inicia uma brilhante, e não muito convencional, carreira de médico, professor e pesquisador, dando contribuições decisivas a distintos campos do conhecimento.

Reconhecido como um dos grandes físicos do século XIX, Helmholtz, na verdade, foi talvez, em vista da amplitude de seus interesses que abarcam trabalhos em Física, Matemática, Fisiologia e Epistemologia, um dos últimos grandes pensadores na tradição de Descartes e Leibniz.

1 Principalmente devido a seu trabalho de 1867 sobre a percepção visual (v. III do Handbuch der Physiologischen Optik)

A influência exercida por Helmholtz na ciência do século XIX pode ser aquilatada não só pela importância de seus trabalhos científicos e epistemológicos, como também por suas atividades acadêmicas nas grandes universidades alemãs, como por exemplo, a de Heidelberg e a de Berlim, onde para ele foram construídos grandes laboratórios (de fisiologia na primeira e de física na segunda).

A sua importância como físico teórico, com trabalhos seminais em Hidrodinâmica (1858), Eletrodinâmica (1870-1892), Termodinâmica (1882-1883) e Mecânica Analítica (1884-1886), é tanto mais surpreendente quando se constata a sua formação como médico cirurgião pelo Instituto Real Friedrich-Wilhelm de Berlim. A dimensão da genialidade de Helmholtz é muito bem apreciada por Maxwell que em 1877, na revista *Nature* refere-se a ele como:

“o mais ilustre exemplo de conhecimento extensivo da ciência, combinado com perfeição, mas de uma perfeição na qual ela mesma exigiu o domínio de muitas ciências e, ao fazê-lo, imprimiu sua marca em cada uma delas”.

Limitamo-nos, no presente trabalho, a comentar alguns dos aspectos que julgamos mais fundamentais da Física de Helmholtz, tida por Pierre Duhem (1893) como um exemplo de solidez, amplitude e unidade, próximas do ideal de sistematização dedutiva que o próprio Duhem perseguiu em seu trabalho de físico teórico. Vejamos como Duhem (1898, p.82) aprecia a teoria física de Helmholtz em seu artigo de 1893, intitulado “A Escola Inglesa e as Teorias Físicas”:

“O que impressiona, numa primeira abordagem, na obra de Helmholtz, é o poder lógico que dá a essa obra uma tão majestosa unidade, uma tão ampla generalidade. Desde o primeiro trabalho de Helmholtz, desde o seu trabalho “Sobre a Conservação da Força” que foi, na ciência, como que o manifesto do qual se originou uma revolução, as grandes linhas dessa obra estão traçadas; depois, com um espírito de continuidade de que a ciência oferece poucos exemplos, Helmholtz retoma cada um dos temas que esboçou, precisa-lhes os contornos, amplia-o, aprofunda-o, e a partir do que não parecia ser mais do que uma advertência, faz surgir todo um ramo da ciência. Sigamos o desenvolvimento de um só desses temas, a eletrodinâmica. No início, no *Erhaltung der Kraft*, apenas algumas páginas lhe são consagradas: a idéia primeira do potencial eletrodinâmico, uma consideração sobre as relações entre as ações eletrodinâmicas e o princípio de conservação de energia; eis os grãos semeados por Helmholtz; contemplemos agora a árvore no seu desenvolvimento; a idéia de potencial eletrodinâmico tornou-se o tronco vigoroso de onde saem, como outros tantos ramos mestres, a teoria da indução, as leis das forças que se exercem entre as correntes, as propriedades dos corpos dielétricos e dos corpos magnéticos; a exposição sumária da ligação que o princípio de conservação da energia estabelece entre as forças ponderomotoras e as forças eletromotoras engendrou esses prodigiosos trabalhos sobre o papel do princípio da mínima ação na física, que une a eletrodinâmica à mecânica, à termodinâmica, à ótica; assim se eleva como um carvalho robusto, essa síntese que parece ter absorvido, elaborado e feito frutificar tudo o que havia de vigoroso na obra eletrodinâmica de W. Weber. F. E. Neumann, Maxwell, Kirchhoff e C. Neumann”.

Helmholtz desenvolve suas teorias físicas procurando uma unidade que vai ser proporcionada, no seu aspecto formal, pela teoria do potencial e pelos métodos variacionais da mecânica analítica. Tanto o aspecto formal como as bases filosóficas foram plantadas no seu famoso artigo de 1847, intitulado “Sobre a Conservação da Força” que comentaremos a seguir.

O “Sobre a Conservação da Força” de 1847

Segundo Koenigsberger (1965, p.37), em fevereiro de 1847, Helmholtz, na condição de cirurgião militar do exército prussiano, enviou a seu amigo Emil du Bois-Reymond o esboço da Introdução ao “Sobre a Conservação da Força”, recebendo deste o entusiasmado comentário (conforme transcrição de Koenigsberger, 1865, p.37): “*um documento histórico de grande interesse científico para todos os tempos*”. Essa receptividade de du Bois-Reymond foi compartilhada por outros colegas de Helmholtz, pelos jovens fisiologistas e pelos jovens físicos da sociedade Física de Berlim (ver Koenigsberger, 1965, p.38 e Helmholtz, 1895, p.277). Também o matemático Gustav Jacob Jacobi fez referências elogiosas

ao trabalho de Helmholtz, reconhecendo nele uma íntima conexão com a linha de pensamento dos matemáticos franceses do século XVIII (ver Helmholtz, 1895, p.276 e Koenigsberger, 1965, p.43).

Contudo, entre as autoridades maiores em física, houve mais reservas do que entusiasmo. Tão logo Helmholtz terminou a apresentação de seu trabalho, lido perante a Sociedade Física de Berlim a 23 de julho de 1847, levou o manuscrito para Gustav Magnus, a fim de que este o referendasse para uma publicação futura no *Annalen der Physik* de Christiaan Poggendorff. Magnus, porém, apesar de reconhecer os méritos do ensaio de Helmholtz, foi bastante cauteloso na recomendação que enviou a Poggendorff (Koenigsberger, 1965, p.38), advertindo Helmholtz repetidamente contra o uso indevido da Matemática, na sua tentativa de interligar diferentes campos da Física.

Poggendorff recusou a publicação do “Sobre a Conservação da Força” no *Annalen*, com a justificativa de que este trabalho não era suficientemente experimental, apesar de reconhecer sua importância como um tratado teórico (Koenigsberger, 1965, p.38).

Essa indisposição contra o Princípio de Conservação da Força pelas autoridades físicas é atribuída por Helmholtz (1895, p.276), em sua autobiografia, à aguda contestação destes à filosofia natural de Hegel e que consequentemente os predisponha a considerar qualquer resultado mais abrangente como “*uma especulação fantástica*”.

Não há dúvidas de que a principal intenção de Helmholtz, ao elaborar o seu ensaio, era a de dar uma contribuição básica à Física Teórica. Logo no início da introdução ao “sobre a Conservação da Força”, ele declara explicitamente o seu objetivo ao chamar a atenção dos físicos para o conteúdo principal do seu trabalho:

“Os assuntos principais do presente artigo são endereçados especialmente aos físicos e, por esta razão, julguei criterioso para estabelecer os princípios fundamentais puramente na forma de uma premissa física, e independente de considerações metafísicas, - para desenvolver as consequências desses princípios e submetê-los a uma comparação com que a experiência tem estabelecido nos vários ramos da Física”. (Helmholtz, 1853, p.114).

A introdução de Helmholtz é um verdadeiro programa geral sobre os objetivos da pesquisa teórica em Física, no qual são firmados pressupostos metafísicos acerca dos fundamentos da realidade natural e das limitações do entendimento. Esses pressupostos metafísicos - que compreendem afirmações baseadas no princípio da causalidade, declarações ontológicas acerca da matéria e da força, afirmações sobre a matéria e a força como forma de abstração e as condições de completa inteligibilidade da natureza (ver Heimann, 1974 e Souza Filho, 1992) - fundamentam sua concepção mecanicista da natureza, semelhante à de Kant no *Metaphysische Anfangsgrunde der Naturwissenschaft* (1786) e à de Laplace no *Exposition du Systeme du Monde* (1796). Porém, Helmholtz ao colocar o teorema das forças vivas, generalizado a todas as partículas, como um princípio de conservação de uma função escalar, mais tarde chamada energia, orientou a sua concepção mecanicista a um rumo diferente do de Kant e Laplace. Estes últimos propunham o desenvolvimento de uma teoria física mecanicista baseada, em última instância, na força de atração e repulsão dos pontos materiais. Em Helmholtz essa perspectiva newtoniana e afirmada, de fato, no início da introdução como uma das duas máximas consideradas por ele como princípios fundamentais:

“todas as ações na natureza podem ser referidas, em última instância, a forças atrativas e repulsivas, cuja intensidade depende unicamente das distâncias entre os pontos sobre os quais as forças são exercidas”.

Relacionado com essa máxima, Helmholtz (1853, p.117) estabelece como tarefa a que deve se dedicar o físico teórico a descoberta, a partir das ações visíveis, das causas fundamentais dos fenômenos que são as forças invariáveis atrativas e repulsivas, cuja intensidade depende somente da distância. Contudo, podemos afirmar que esse programa newtoniano/kantiano/laplaciano em vista de alguns desenvolvimentos nesse trabalho de 1847 e em seus trabalhos posteriores, permanecerá mais como uma declaração metafísica não revelando efetivamente, do ponto de vista operacional, o conteúdo básico do programa teórico de Helmholtz. Esse conteúdo é, de fato, representado pela teoria do potencial e pelos métodos variacionais de Lagrange e Hamilton. No “Sobre a Conservação da Força”- apesar da importância atribuída por Helmholtz às forças centrais entre os pontos materiais (ver Clark, 1976 e Souza Filho, 1992)

- esse conteúdo é designado pelo teorema das forças vivas, interpretado como a constância da soma da variação das vis viva e da “soma de tensões”, ou seja, como a constância da soma da energia cinética e da energia potencial em todos os processos físicos:

$$\frac{1}{2}mQ^2 - \frac{1}{2}mq^2 = -\int_r^R \emptyset dr,$$

onde $\emptyset = \emptyset(r)$ é uma força central, m é a massa do ponto material e Q, q as velocidades de m , respectivamente nas posições R e r .

Generalizando para um sistema com um número qualquer de pontos materiais, Helmholtz (1853, p.124) obtem o princípio de conservação da força (entendemos hoje como princípio de conservação da energia mecânica) em toda a sua generalidade:

$$\sum \left[\frac{1}{2} m_a Q_a^2 \right] - \sum \left[\frac{1}{2} m_a Q_a'^2 \right] = - \sum \left[\int_{r_{ab}}^{R_{ab}} \emptyset_{ab} dr_{ab} \right].$$

Helmholtz aperfeiçoará ao longo dos anos o seu aparato formal desenvolvendo teorias físicas em torno do estabelecimento de potenciais gerais [eletrodinâmicos, termodinâmicos (energia livre), de velocidade (hidrodinâmica)] e da aplicação do princípio da mínima ação na física.

Cabe enfatizar que o germe desse programa já está contido efetivamente no “Sobre a Conservação da Força” de 1847 por meio da generalização do teorema das forças vivas, vista acima, e da segunda máxima, tida como um princípio fundamental:

“Não é possível, por qualquer combinação que seja dos corpos naturais, produzir uma quantidade ilimitada de força mecânica...”

A máxima acima é o princípio de exclusão do moto-perpétuo que estabelece a impossibilidade de produzir força continuamente, qualquer que seja a combinação de corpos naturais. Helmholtz (1853, p.118) toma essa máxima como um pressuposto empírico e o estende a todos os ramos da Física mencionando o resultado obtido por Carnot e Clayperon no estudo das máquinas térmicas. O princípio de exclusão do moto-perpétuo é invocado para justificar o princípio de conservação da força e, nesse contexto, favorece uma perspectiva analítica no enfoque dos sistemas físicos, pois, trata-se de buscar, sobretudo, as propriedades globais do sistema e construir as funções matemáticas que as representam.

Alguns dos trabalhos mais representativos da Física de Helmholtz.

Em 1858 Helmholtz publica no Crelle's Journal o seminal artigo em hidrodinâmica intitulado “Sobre as Integrais das Equações Hidrodinâmicas que representam o Movimento de Vórtice”. Nesse artigo ele demonstra que se um fluido está em repouso ou sem movimento inicial de vórtice, então a vorticidade só pode ser criada por fricção ou pela presença de extremidades agudas de um corpo. Assim, para um fluido em movimento sem apresentar movimento de vórtice existe um potencial velocidade ϕ , conforme determinado por Euler, nas seguintes condições:

$$\vec{\nabla}\phi = \vec{v} \text{ e } \vec{\nabla} \times \vec{v} = 0$$

Existindo movimento de vórtice tem-se que $\vec{\nabla} \times \vec{v} = 2\vec{\omega}$ ($\vec{\omega}$ é a velocidade angular de um dado elemento do fluido), o que significa que \vec{v} não pode ser escrito como um potencial velocidade ϕ . A partir daí Helmholtz estabelece o princípio de conservação dos vórtices dado pela relação:

$$\frac{d\vec{\omega}}{dt} = \vec{\omega}(\vec{\nabla} \cdot \vec{v}),$$

também conhecida como equação da vorticidade. Ele define a seguir linha de vórtice e tubo de vórtice para estabelecer dois importantes teoremas. Uma linha de vórtice é uma curva que tem a mesma direção do vetor

$$\vec{\omega} = \vec{\nabla} \times \vec{v}$$

em cada ponto e em cada tempo t . Um tubo de vórtice é um tubo formado pelas linhas de vórtice que passam sobre todos os pontos de uma circunferência de uma superfície infinitamente pequena dentro do fluido. Então temos (ver Acheson, 1990, p.162-3) os seguintes teoremas para um fluido incompressível, não viscoso e na presença de uma força conservativa:

- 1º) os elementos do fluido que estão em uma linha de vórtice em algum instante permanecem na linha de vórtice, ou seja, as linhas de vórtice movem-se com o fluido;
- 2º) a quantidade

$$\Gamma = \int_S \vec{\omega} \cdot \vec{n} \, dS$$

é a mesma para todas as seções transversais S de um tubo de vórtice. Além disso, Γ é independente do tempo.

Para encontrar \vec{v} em função de $\vec{\omega}$, Helmholtz estabeleceu as três condições: $\vec{\nabla} \cdot \vec{\omega} = 0$, $\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0$ e $\vec{\nabla} \times \vec{v} = 2\vec{\omega}$ obtendo a seguinte solução:

$$v_x = \frac{dP}{dx} + \frac{dN}{dy} - \frac{dM}{dz},$$

$$v_y = \frac{dP}{dy} + \frac{dL}{dz} - \frac{dN}{dx},$$

$$v_z = \frac{dP}{dz} + \frac{dM}{dx} - \frac{dL}{dy}$$

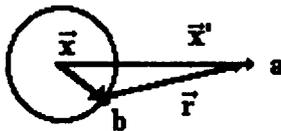
P faz o papel de um potencial escalar enquanto que L, M, e N fazem o papel de componentes de um potencial vetor \vec{A} (ver Turner, 1971). Usando uma analogia com o magnetismo, Helmholtz assim definiu L, M e N como integrais de volume sobre o espaço do fluido de um potencial exercido sobre um ponto externo x, y, z por um fluido distribuido com densidade w/r:

$$L = -\frac{1}{2\pi} \iiint \frac{w_x}{r} da db dc,$$

$$M = -\frac{1}{2\pi} \iiint \frac{w_y}{r} da db dc$$

$$N = -\frac{1}{2\pi} \iiint \frac{w_z}{r} da db dc$$

Estas relações permitem Helmholtz calcular a velocidade induzida em uma partícula a por uma partícula em rotação b a uma distância r (ver figura abaixo), obtendo uma fórmula análoga, formalmente, à lei de Biot-Savart para o efeito magnético de uma corrente elétrica:



$$d\vec{v}_{ind} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\vec{w}_b \times \vec{r}}{r^3},$$

onde $\vec{r} = \vec{x}' - \vec{x}$.

Nos anos de 1870, 1873 e 1874, Helmholtz publicou em três partes no Crelle's Journal o importante artigo intitulado "Sobre a Teoria Eletrodinâmica". Esses artigos constituem a base da eletrodinâmica de Helmholtz que é, segundo Pierre Duhem, o prolongamento lógico das doutrinas de Poisson, Ampère, Weber e Neuman e que conduzem às mesmas consequências da teoria de Maxwell evitando as contradições deste (ver O'Rahilly, 1965, p. 177). Segundo Duhem (1894, p.263), não se encontra na teoria

eletromagnética de Helmholtz hipóteses sobre a natureza da corrente como na teoria de Maxwell onde a corrente elétrica é a manifestação de um certo estado de movimento estacionário e a energia eletrodinâmica é a energia cinética desse movimento; tampouco, segundo Duhem, a eletrodinâmica de Helmholtz pretende reduzir as equações da eletrodinâmica às equações da dinâmica.

O trabalho fundamental de Helmholtz consiste na formulação de um potencial eletrodinâmico generalizado que torna os resultados até então obtidos por Neumann, Weber e Maxwell, seus casos particulares. Assim, generalizando o potencial eletrodinâmico entre dois elementos lineares de corrente, ds_1 e ds_2 Helmholtz (ver Woodruff, 1968, p.303 e Turner, 1971, p.251) obtem:

$$-\frac{1}{2c^2} \frac{i_1 \cdot i_2}{r} [(1+k) d\vec{s}_1 \cdot d\vec{s}_2 + (1-k) \frac{(\vec{r} \cdot d\vec{s}_1)(\vec{r} \cdot d\vec{s}_2)}{r^2}],$$

onde c é uma velocidade constante indeterminada, i_1 e i_2 as correntes que passam respectivamente em ds_1 e ds_2 , \vec{r} a distância entre os elementos de corrente e K é uma constante indeterminada. Para $K = -1$, a equação acima toma a forma da lei de Weber; para $K=1$, ela se reduz ao potencial de Neumann; e para $k=0$, pode ser obtido os resultados da teoria de Maxwell introduzindo um meio dielétrico.

Essa equação do potencial é estendida para abarcar condutores em três dimensões resultando em uma expressão para o potencial, integrado em todo o espaço:

$$U(\vec{x}, t) = \int \left[\frac{1+k}{2} \frac{\vec{j}(\vec{x}', t)}{r} + \frac{1-k}{2} \frac{\vec{r} \cdot \vec{j}(\vec{x}', t)}{r^3} \right] d^3\vec{x}',$$

onde $\vec{r} = \vec{x} - \vec{x}'$ e $\vec{j}(\vec{x}', t)$ é a densidade de corrente.

Helmholtz tornou as teorias de Maxwell inteligíveis aos físicos europeus (ver Turner, 1971, p.251), e guiou as pesquisas experimentais de Hertz que confirmaram a radiação eletromagnética de Maxwell. Não há dúvidas acerca da importância do trabalho eletrodinâmico de Helmholtz e do prestígio que gozava nos círculos científicos da época. No entanto, os seus esforços teóricos dirigiam-se independentemente das considerações sobre um éter dielétrico magnetizável - sobretudo, à construção de uma teoria eletromagnética unitária e consistente com o princípio de conservação da energia e os métodos variacionais de Lagrange e Hamilton.

Helmholtz vai trabalhar a partir de 1876 em problemas relativos às correntes elétricas em pilhas galvânicas, o que o conduz à termodinâmica dos processos irreversíveis na relação de reações químicas e fenômenos elétricos.

Sua pesquisa em físico-química culmina com a publicação em 1882 do importante artigo intitulado "Termodinâmica dos Processos Químicos". Neste artigo, Helmholtz distingue entre energia livre e ligada nas reações químicas estabelecendo uma equação que determina a direção da reação química a temperatura e volume constantes:

$$F = U - T \frac{\partial F}{\partial T},$$

onde F é a energia livre, U a energia total, T a temperatura absoluta e $\frac{\delta F}{\delta T}$ a entropia. A reação química

ocorre quando F é um mínimo. esse método de Helmholtz que procura compreender as condições de equilíbrio e estabilidade nas reações químicas já havia sido empregado por Massieu em 1869 e por Gibbs em 1875. Duhem (1884, p.1113) denomina-o de método dos potenciais termodinâmicos.

A semelhança do princípio dos trabalhos virtuais na estática e o método dos potenciais termodinâmicos conduziram Helmholtz a aprofundar as analogias possíveis entre os métodos variacionais da mecânica analítica e a termodinâmica em um trabalho publicado em 1884 no *Crelle's Journal* e intitulado "Princípios da Estática dos Sistemas Monocíclicos". Nesse trabalho, ao definir um sistema monocíclico, Helmholtz procura fazer corresponder suas propriedades às propriedades termodinâmicas como energia interna, quantidade de calor, temperatura e entropia. Contudo, Helmholtz não tem como objetivo a redução das leis da termodinâmica às leis da mecânica. Ele busca tão somente uma analogia formal. Vejamos o que Helmholtz (in Duhem, 1992, p.116) diz a esse respeito:

Tomar as propriedades mais gerais do movimento calorífico que nos sejam conhecidos e procurar sob quais condições muito amplas essas propriedades se reproduzem em outras classes bem conhecidas de movimentos. Minhas pesquisas nesse sentido levaram-me a descobrir as analogias que existem entre o movimento calorífico e os movimentos monocíclicos que tenho estudado. Porém, tenho constantemente posto em evidência esta verdade que declarei desde o início: falando rigorosamente, o movimento calorífico não pode ser monocíclico. Também, jamais pronunciei a pretensão de haver dado uma explicação do segundo princípio da termodinâmica".

Um sistema monocíclico (ver Duhem, 1992, p.117) pode ser entendido observando o movimento giratório extremamente rápido de um pião. Aparentemente, ou melhor, macroscopicamente ele está parado, pois, cada uma das partes que o compõem realiza um rápido movimento circular de molde que a cada instante cada massa elementar do pião é substituída por outra semelhante. Um pião rodando é um sistema em regime permanente que Helmholtz chama de sistema monocíclico em equilíbrio. A analogia com a teoria mecânica do calor, segundo Duhem, é devido a que o equilíbrio do pião é aparente, isto é, sob este equilíbrio oculta-se movimentos estacionários muito rápidos.

Helmholtz buscará no princípio da mínima ação, conforme podemos verificar pelos seus últimos trabalhos até 1894, um modo formal de unificação das teorias físicas, procurando estender os métodos variacionais da mecânica analítica à física como um todo. Nesse sentido, o seu intento talvez seja muito mais próximo da perspectiva formal da energética duhemiana do que da perspectiva atomística reducionista contida na introdução ao "Sobre a Conservação da Força" de 1847. Não temos elementos para uma conclusão mais categórica a esse respeito. Contudo, este é um tema que valerá a pena investigar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHESON**, D. J. *Elementary Fluid Dynamics*. Clarendon Press: Oxford, 1990.
- CLARK**, P., Elkana on Helmholtz and the Conservation of Energy, *Brit. J. Hist. Sci.*, n.27, p.165-76.
- DUHEM**, P., 1989, A Escola Inglesa e as Teorias Físicas, *Ciência e Filosofia*, n.4, FFLCHUSP, p.63-84;
"L'école Anglaise et les Théories Physiques", 1893. *Revue des Questions Scientifiques*, t.II, XXXIV, p.345-378.
- _____. *L'évolution de la Mécanique*. J. Vrin, Paris. 1992
- _____. "Sur le Potentiel Thermodynamique et la Théorie de la Pile Voltaïque". *Comptes Rendus*, t. 99, p.1113-1115.
- _____. Ouvrages Récents de Physique Mathématique (resenhas de livros). *Revue des Questions Scientifiques*, 12^o série, t.III, p.257-265.
- FULLINWIDER**, S. P., Hermann Von Helmholtz: The Problem of Kantian Influence. *Stud. Hist. Phil. Sci.*, v.21, n.1, p.41-55, 1990.
- HEIMANN**, P. M. Helmholtz and Kant : The Metaphysical Foundation of "über die Erhaltung der Kraft". *Stud. Hist. Phil. Sci.*, n.5, p.205-238, 1974.
- HELMHOLTZ**, H. An autobiographical sketch". *Popular Lectures on Scientific Subjects, serie 2*, Logmans/Green & Co., London/New York, p.269-91.
- _____. On the Conservation of Force, Scientific Memoirs. *Natural Philosophy*, v.1, part 2, Taylor & Francis, p.114-162.
- KOENIGSBERGER**, L., *Herman Von Helmholtz*, Dover. 1965
- MAXWELL**, J. C. Hermann Ludwig Ferdinand Helmholtz, *Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Dover, p.592-598, 1965.
- O'RAHILLY**, A. *Electromagnetic Theory: a critical examination of fundamentals*, Dover, New York, 1965. v.1.
- RICHARDS**, J. L., 1977, "The Evolution of Empiricism: Hermann Von Helmholtz and the Foundations of Geometry. *Brit. J. Phil. Sci.*, 28, p.235-253.
- SOUZA FILHO**, O. M. S. Helmholtz e a Conservação da Energia", In: Fátima R. R. Évora (Ed.), *Século XIX: o nascimento da Ciência Contemporânea*, v. 11, Coleção CLE, p. 377-404, 1992
- TURNER**, R. S. Hermann Von Helmholtz, In: C.C. Gillespie (Ed.), *Dictionary of Scientific Biography*, Charles Scribner, New York: p.241-253, 1971
- WOODRUFF**, A. E. The Contributions of Hermann von Helmholtz to Electrodynamics *Isis*, v.59, 3, n.198, p.300-311, 1968.

OSVALDO MELO SOUZA FILHO é Doutorando no Departamento de Filosofia da USP e Professor da Academia da Força Aérea em Pirassununga - SP

Endereço: Rua D-3, casa 10 - Vila dos Oficiais - Cep: 13.630-000 - Pirassununga - São Paulo - Brasil