



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
MESTRADO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E EDUCAÇÃO MATEMÁTICA

**O USO DE CONTROVÉRSIAS CIENTÍFICAS PARA A
COMPREENSÃO DA NATUREZA DA CIÊNCIA: O CASO DO
PRINCÍPIO DE AÇÃO MÍNIMA**

ISABELLE PRISCILA CARNEIRO DE LIMA

Campina Grande/PB

2014

ISABELLE PRISCILA CARNEIRO DE LIMA

**O USO DE CONTROVÉRSIAS CIENTÍFICAS PARA A
COMPREENSÃO DA NATUREZA DA CIÊNCIA: O CASO DO
PRINCÍPIO DE AÇÃO MÍNIMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ensino de Ciências e Matemática do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito para obtenção do título de Mestre Profissional em Ensino de Ciências e Matemática.

Área de Concentração: Ensino de Física
Orientador: Roberto de Andrade Martins

Campina Grande/PB

2014

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

L732u Lima, Isabelle Priscila Carneiro de.

O uso de controvérsias científicas para a compreensão da natureza da ciência [manuscrito] : o caso do princípio de ação mínima / Isabelle Priscila Carneiro de Lima. - 2014.

186 p. : il. color.

Digitado.

Dissertação (Mestrado em Mestrado Profissional em Ensino de Ciências e Matemática) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Roberto de Andrade Martins, Departamento de Física".

1. História da ciência. 2. Controvérsias científicas. 3. Princípio de ação mínima. 4. Ensino de física. I. Título.

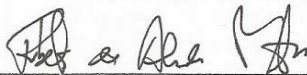
21. ed. CDD 501

ISABELLE PRISCILA CARNEIRO DE LIMA

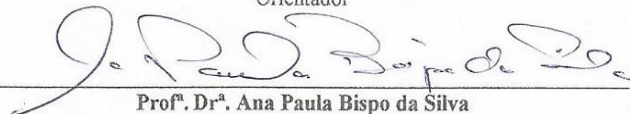
O USO DE CONTROVÉRSIAS CIENTÍFICAS PARA A
COMPREENSÃO DA NATUREZA DA CIÊNCIA: O CASO DO
PRINCÍPIO DE AÇÃO MÍNIMA

Aprovado em: 27/02/2014.

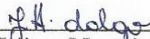
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Roberto de Andrade Martins
Departamento de Física/CCT/UEPB
Orientador



Prof.ª Dr.ª Ana Paula Bispo da Silva
Departamento de Física/CCT/UEPB
Examinadora Interna



Prof.ª Dr.ª Juliana Mesquita Hidalgo Ferreira
Departamento de Física/UFRN
Examinadora Externa

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

AGRADECIMENTOS

A esta força superior que me orienta todos os dias e que, de uma forma tão intensa, me faz sentir sua presença principalmente durante as madrugadas de trabalho, quando ninguém mais me assiste presencialmente.

Ao Professor Roberto de Andrade Martins pela paciência, principalmente, pela dedicação, compreensão e pela sábia orientação. Obrigada pelas boas energias que a mim foram transmitidas durante os encontros para orientação.

À professora Juliana Hidalgo pela gentileza de aceitar o convite para avaliação do meu trabalho e pelas contribuições fundamentais para o bom andamento da minha pesquisa, depois da qualificação.

À professora Ana Paula Bispo agradeço primeiramente por ter me presenteado com a orientação do Prof. Roberto. Além disso, agradeço tanto pelas colaborações Acadêmicas, desde às orientações no Grupo de Pesquisa (GHCEN), quanto pelas efetivas colaborações no meu trabalho de dissertação, não somente no que se refere ao texto, mas ao processo externo relacionado ao fazer acadêmico. Agradeço pela confiança em mim depositada nestes quatro anos de convivência, divididos entre o trabalho na Academia e as relações pessoais, o que se reflete nas boas risadas desfrutadas em momentos extracientíficos.

Aos meus familiares pela confiança e incentivo durante tantos anos de vida acadêmica. Pela força financeira, principalmente, quando me permitiram dedicação integral à pesquisa acadêmica. Eternamente grata aos meus pais, Ivete e Josebi, à Paloma minha irmã, à Das Virgens, minha avó, que sempre viu em mim esperança de um novo amanhã e aos meus tios.

Aos meus colegas de mestrado, que se tornaram amigos de verdade, Praxedes, Tony, Lede e Fernando, com quem dividi alegrias, ansiedades e todos os outros sentimentos possíveis a um pós graduando. E às minhas verdadeiras amigas Myrna, Gaby e Emília que compreenderam (às vezes) minhas ausências decorrentes dessa loucura acadêmica.

Ao anjo de guarda que cuida de mim há dois anos, Micaela Sá. Uma companheira que me ensinou a ser mais paciente e muito mais corajosa. Alguém com quem dividi também a vida acadêmica, compartilhando opiniões, desprendendo horas de discussões a respeito dos nossos trabalhos, além das angústias e satisfações proporcionadas pelo trabalho de escrita. Obrigada pela companhia nas madrugadas quando a ansiedade me vencia e você, pacientemente, fazia minhas aflições tornarem-se belos sorrisos.

RESUMO

A compreensão da Natureza da Ciência, a partir da abordagem de elementos de História e Filosofia da Ciência, no ensino de Física, tem sido objetivo de pesquisas que buscam uma melhoria na relação ensino-aprendizagem nas aulas desta ciência. O estudo de episódios históricos controversos pode facilitar a abordagem de tais elementos, bem como apresentar o conhecimento físico como processo histórico, em contínua transformação e associado às outras formas de expressão e produção humanas. O nosso trabalho objetivou-se em apresentar o Princípio de Ação Mínima numa perspectiva histórica, identificando e analisando os elementos que caracterizam a controvérsia em torno do conceito de ação e deste princípio. Neste sentido, foram observados aspectos relacionados à prevalência de teorias, às relações de poder entre os personagens, às alianças construídas ou não entre eles, com o intuito de apresentar o desenvolvimento da ciência a partir dos aspectos de sua natureza. A controvérsia objeto de nossa análise, aconteceu no século XVIII, tendo como personagens principais Maupertuis, Voltaire, Euler, König e o Rei Frèderic II. Como produto Educacional, elaboramos dois Módulos Didáticos contemplando os conceitos científicos necessários para a compreensão do Princípio (relacionados aos dois artigos de Maupertuis), além dos aspectos da Natureza da Ciência presentes na discussão, um material audiovisual e as respectivas Sequências Didáticas para a possível orientação na utilização dos mesmos. Com isso, pretende-se oferecer ao professor dos cursos de Licenciatura em Física, um material que contemple conceitos científicos numa perspectiva que ultrapasse a reprodução de equações matemáticas, viabilizando a apresentação da influência dos fatores sociais sobre o raciocínio científico, e que muitas vezes justificam os problemas que originam os desacordos, ou as dificuldades para a afirmação de teorias. Para subsidiar a nossa pesquisa, buscamos em Martins (1990; 1993; 2006), Matthews (1995), El-Hani (2006), Kuhn (1962) entender o propósito dos estudos da História da Ciência, bem como justificar o seu uso no ensino de Ciências; para a análise da controvérsia nos embasamos nos estudos de Brante & Elzinga (1990), Narasihman (2001), Machamer, et al (2000), dentre outros autores.

Palavras chave: História da Ciência, Controvérsias Científicas; Princípio de Ação Mínima.

ABSTRACT

The comprehension of Nature of Science, from the elements of history and philosophy of science approach, in the teaching of physics, has been the subject of research seeking an improvement in teaching - learning in the science's classroom. The study of controversial historical episodes can facilitate the approach of these elements, as well as presenting the physical knowledge as a historical process, in continuous transformation and associated with other forms of human expression and production. Our work aims to present the least action principle in a historical perspective, identifying and analyzing the elements that characterize the controversy around the concept of action and this principle. In this sense, aspects related to the prevalence of theories, relations of power between characters, or not, to build alliances between them, in order to present the development of science from the aspects of his nature were observed. The Controversy subject of our analysis, happened in the eighteenth century, and the main characters were Maupertuis, Voltaire, Euler, König and The King Frédéric II, the Great. As Educational Products, we developed two Didactic Modules contemplating the scientific concepts needed to understand the principle (related to two articles of Maupertuis), an audiovisual material, and Teaching Sequences to the possible orientation in the use of them. With this, we intend to offer the teacher of physics' undergraduate courses, a material that contemplates scientific concepts in a perspective that goes beyond the reproduction of mathematical equations, enabling the presentation of the influence of social factors on scientific reasoning, and often justifying the problems that cause disagreements, or difficulties for the affirmation of theories. To support our research, we seek Martins (1990, 1993, 2006) , Matthews (1995) , El - Hani (2006), Kuhn (1962) to understand the purpose of the study of the History of Science and justify its use in science teaching, to the analysis of controversy we have based in studies of Brante & Elzinga (1990), Narasihman (2001), Machamer, et al (2000), among other authors.

Key words: History of Science – Scientific Controversies - Principle of Least Action – Physics Teaching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação de Heron de Alexandria para reflexão da luz por dois caminhos diferentes.....	58
Figura 2: Esquemática da reflexão da luz feita por Heron de Alexandria para provar o seu Princípio de Mínimo.....	58
Figura 3: Esquema do experimento realizado por Ptolomeu para explicar a refração da luz entre dois meios diferentes quando o recipiente está vazio e quando está preenchido com água. Fonte: Notas de aula – autoria Roberto de Andrade Martins	60
Figura 4: esquema apresentado por Descartes no seu livro Dióptrica para explicar a analogia mecânica que lhe permitiu chegar à lei dos senos. Fonte: MAGIE (1935, p. 268).....	62
Figura 5: Análise geométrica da equivalência das componentes paralelas da velocidade da luz a partir da analogia feita por Descartes. Fonte: Arquivo em Power Point – autoria Roberto de Andrade Martins	63
Figura 6: Círculo representativo utilizado por Fermat para explicar a refração de um raio de luz.....	65
Figura 7: Representação da refração da luz. FONTE: MAUPERTUIS (1744, p.424).....	69
Figura 8: Representação dos o choque entre os corpos A e B, e a marcação da linha AA, localizada exatamente no centro de gravidade dos corpos.....	75
Figura 9: Representação da colisão entre dois corpos elásticos.....	78
Figura 10: Movimento de duas esferas sob o ponto de vista de dois observadores. Esquema elaborado por Huygens para explicar a relatividade do movimento. Fonte: (HUGENII, 1703, 399).....	81
Figura 11: Representação do ponto N superior ao ponto Q, caso em que as velocidades de A e de B seriam $CD < CA$ e $CE > CB$, não se conservando assim, a velocidade relativa.....	83
Figura 12: Representação do ponto Q superior ao ponto N.....	83
Figura 13: Representação esquemática dos corpos A e B antes e depois da colisão..	89
Figura 14: Esquema da colisão dos corpos elásticos A e B.....	91
Figura 15: Representação de uma alavanca em equilíbrio. Fonte: Arquivo em Power Point – autoria Roberto de Andrade Martins.....	95
Figura 16: Representação de uma alavanca estudada por Maupertuis, supondo uma mudança de variáveis. A distância entre o corpo A e o ponto de suspensão da mesma indicada por d e o comprimento total indicado por x.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores das velocidades, das massas e das distâncias percorridas pelos corpos A e B em uma colisão entre corpos duros.....	89
Tabela 2: Valores das velocidades, das massas e das distâncias percorridas pelos corpos A e B em uma colisão entre corpos elásticos.....	92

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1:	Relação de proporcionalidade escrita por Heron de Alexandria para demonstrar que o caminho seguido por um raio de luz é o mínimo possível.....	58
Equação 2:	Relação de proporcionalidade escrita por Heron para demonstração de que os ângulos de incidência e reflexão do raio que percorre o menor caminho também são os menores possíveis.....	59
Equação 3:	Expressão da relação entre os senos dos ângulos de incidência e refração e suas respectivas velocidades desses raios, escrita por Descartes.....	63
Equação 4:	Equação escrita por Fermat para expressão do mínimo tempo da incidência de um raio de luz.....	65
Equação 5:	Relação apresentada por Fermat escrita em função da velocidade da distância percorrida pelo raio.....	66
Equação 6:	Expressão do Princípio de Ação Mínima de Maupertuis.....	70
Equação 7:	Segundo passo para a escrita da relação dos senos dos ângulos de incidência e refração dos raios de luz, de Maupertuis.....	70
Equação 8:	Terceiro passo para a escrita da relação dos senos dos ângulos de incidência e refração dos raios de luz, de Maupertuis.....	70
Equação 9:	Relação entre os senos e as velocidades dos raios de incidência e refração da luz, escrita por Maupertuis.....	70
Equação 10:	Expressão da velocidade comum adquirida por dois corpos macios após a colisão ($v=0$).....	76
Equação 11:	Expressão da velocidade comum adquirida por dois corpos macios após a colisão ($v=v'$).....	76
Equação 12:	Cálculo da velocidade comum dos corpos A e B, inelásticos, encontrada por Maupertuis, utilizando o seu Princípio de Ação Mínima.....	90
Equação 13:	Princípio de Ação Mínima aplicado à colisão de corpos elásticos.....	92
Equação 14:	Relação entre as velocidades relativas, do início e do final do movimento, α e β , em uma colisão de corpos elásticos.....	92
Equação 15:	Valor da velocidade do corpo A, α , após a colisão.....	92
Equação 16:	Valor da velocidade do corpo B, β , após a colisão.....	93
Equação 17:	Velocidades α e β , se a velocidade inicial do corpo é $-b$	93
Equação 18:	Velocidades α e β , se a velocidade inicial de um dos corpos é 0.....	93
Equação 19:	Aplicação do Princípio de Ação Mínima ao funcionamento de uma alavancas.....	95
Equação 20:	Valor Mínimo da distância entre o ponto central, de equilíbrio e uma das extremidades de uma alavanca.....	95
Equação 21:	Aplicação do Princípio de Ação Mínima ao fenômeno de colisões, utilizando o mesmo raciocínio utilizado para a aplicação à óptica.....	96
Equação 22:	Demonstração de que o Princípio de Ação Mínima, usando o mesmo raciocínio aplicado à óptica, oferece um resultado	96

	errado para a aplicação ao fenômeno de colisões.....	
Equação 23:	Demonstração de que o Princípio de Ação Mínima, usando o mesmo raciocínio aplicado à óptica, oferece um resultado errado para aplicação ao equilíbrio das alavancas.....	97

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. A HISTÓRIA DA CIÊNCIA E O ENSINO DE CIÊNCIAS.....	21
2.1 A abordagem histórico-social e a formação de professores	22
2.2 O uso de episódios históricos e o papel das controvérsias científicas na compreensão da natureza da ciência.....	26
2.3 A compreensão da natureza da ciência.....	30
3. CONTROVÉRSIAS CIENTÍFICAS: NOTAS INTRODUTÓRIAS	34
3.1 O que é uma controvérsia?	35
3.2 Fatores que influenciam as controvérsias.....	38
3.3 Classificação de controvérsias – a relação entre o seu desenvolvimento e as questões que as originaram.....	43
3.4 A conclusão de uma controvérsia	47
3.5 As controvérsias e suas possíveis abordagens	49
3.6 Por que estudar controvérsias?	51
3.7 Aspectos para análise da controvérsia estudada.....	53
4. EPISÓDIO ESCOLHIDO - O PRINCÍPIO DE AÇÃO MÍNIMA	56
4.1 O Princípio de Ação Mínima e sua aplicação à Óptica	56
4.1.1 O Princípio de Mínimo de Heron de Alexandria	56
4.1.2 A refração de Ptolomeu	60
4.1.3 A analogia mecânica de Descartes	62
4.1.4 Fermat e o Princípio de Mínimo Tempo	64
4.1.5 Newton e a interpretação corpuscular	67
4.1.6 Leibniz, o princípio de menor resistência e as causas finais.....	68
4.1.7 As contribuições de Maupertuis: O princípio de ação mínima e sua aplicação à óptica	69
4.2 O Princípio de Ação Mínima e suas aplicações à colisões dos corpos e ao equilíbrio das alavancas	75
4.2.1 As leis do impacto – Teorias anteriores ao trabalho de Maupertuis.....	75
4.2.2 John Wallis e os corpos elásticos.....	75
4.2.3 As contribuições de Christopher Wren.....	79
4.2.4 As investigações de Huygens	80
4.2.5 As considerações de Maupertuis.....	85
5. ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	99

6. ANÁLISE DA CONTROVÉRSIA PRESENTE NO EPISÓDIO.....	103
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

1. INTRODUÇÃO

Desde o século XVIII, o Ensino de Ciências é discutido, tanto no que diz respeito à sua implementação na educação formal, quanto à estrutura do seu currículo. O Brasil segue as tendências adotadas nos países desenvolvidos desde o surgimento das primeiras instituições para o ensino de ciências naturais e, na segunda metade do século XX, chega à adotar os Projetos de Ciências, a saber: Projeto para o Ensino de Física (PEF), Projeto Harvard, Projeto 2061, *Physical Science Study Committee* (PSSC), dentre outros.

Atualmente, as disciplinas que compõem este currículo, estão organizadas em uma das áreas do conhecimento proposta pelo Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio, denominada Ciências da Natureza e suas Tecnologias. Esta área compreende Física, Química e Biologia e a justificativa para estarem agrupadas é o fato de “compartilharem objetos de estudo e, portanto, mais facilmente se comunicarem, criando condições para que a prática escolar se desenvolva numa perspectiva de interdisciplinaridade” (BRASIL, 2000, p. 18).

Ainda assim, o currículo que compreende as ciências naturais é encarado apenas como necessário para a preparação de estudantes interessados em competir nas Olimpíadas oferecidas pelas instâncias governamentais ou apenas como parcela de um conteúdo programático necessário para o ingresso no ensino superior.

Diante de tal realidade, os pesquisadores em Ensino de Ciências têm realizado estudos conjecturando alternativas para a melhoria do ensino desta área, desde a educação básica ao ensino superior. Para tanto, são realizadas pesquisas que viabilizem abordagens no *campo experimental*, levando aos alunos uma ciência mais palpável, que permitam aos alunos observar suas aplicações, o contexto no qual foi desenvolvida, uma vez que a abstração inerente a ela é, em parte, superada; através das *tecnologias da informação e comunicação*, buscando promover a aproximação da realidade tecnológica vivenciada pelos alunos ao estudo da ciência; a partir de *abordagens artísticas* – teatro, jogos, música, filmes – buscando um meio de compartilhar e facilitar a compreensão do conhecimento científico através de atividades lúdicas; dentre outras.

Algumas dessas tentativas são viáveis, outras nem tanto, mas todas pretendem apresentar a ciência de uma maneira que permita ao aluno observar, interagir e, principalmente, compreender os fenômenos da natureza, a partir da apresentação, do desenvolvimento da ciência ao longo do tempo.

Utilizando-se muitas vezes dessas abordagens, o material didático elaborado para o ensino de Física não leva em consideração, devidamente, o contexto histórico no qual o cientista esteve inserido e os conceitos são discutidos como se tivessem sido concebidos naturalmente por grandes gênios, de uma forma linear. É na perspectiva de melhoria do ensino das Ciências e da desconstrução da ideia de uma ciência instantânea, na tentativa de ir além de um ensino que prioriza as abordagens em que a ciência é vista como algo pronto e produto de gênios infalíveis, livre das influências da sociedade e dos aspectos sociais, que pretendemos apresentar ao aluno o processo de investigação para a elaboração de alguns conceitos e teorias que estão, simplesmente postos nos livros didáticos.

Dessa maneira, uma alternativa que vem sendo notabilizada é a abordagem da ciência numa perspectiva histórica, ou seja, a História da Ciência sendo utilizada como subsídio para facilitar a compreensão de conceitos científicos, na tentativa de enriquecer as aulas e apresentar a ciência de uma maneira cada vez mais como produto de seres falíveis e suas contribuições ao longo do tempo.

A utilização da História da Ciência, no Ensino das Ciências para a compreensão da sua natureza, sobretudo na área da Física, nosso campo de atuação, vem ganhando espaço no contexto das pesquisas acadêmicas. Isso pode ser observado em estudos veiculados nesta comunidade, através de periódicos de circulação tanto nacional, quanto internacional, em livros, dissertações e teses, além das comunicações realizadas em eventos da área. Vejamos, por exemplo, a discussão apresentada por SILVA (2010), intitulada *Controvérsia sobre a natureza da luz: Uma aplicação didática*; a tese defendida por Moura (2012), sobre *A formação crítico-transformadora de professores em Física: uma proposta a partir da História da Ciência*, os artigos de Martins (1999; 2006a; 2006b), Silva (2008), Silva e Moura (2008), Forato (2009), etc.

Ainda quanto à importância da utilização da História da Ciência, Kuhn (1962) caracteriza-a como a disciplina que registra as contribuições sucessivas (resultantes dos estudos do cientista como sendo alguém que, com ou sem sucesso, contribuiu com algum elemento componente do conhecimento científico) e os obstáculos enfrentados no desenvolvimento de teorias científicas. Por isso, o estudo da História da Ciência tem como tarefas principais identificar a época, os personagens, o que eles estudaram, e descrever os erros que impediram o progresso do conhecimento em determinados momentos, além dos mitos e superstições resultantes destes momentos que se perpetuam até os dias atuais.

Os estudos de Matthews (1995) demonstram uma tentativa de aproximação da ciência com a história e filosofia da ciência, configurando-se como uma forma de aproximar a ciência dos interesses pessoais e éticos, dando significado ao ensino, atribuindo um caráter reflexivo às aulas de ciências. Além disso, a introdução de conceitos a partir da História da Ciência, segundo Martins (1990, p. 4), permite conhecer a natureza da ciência, pois o professor pode abordar tantos os aspectos puramente técnicos quanto os estudos de aspectos sociais, culturais e humanos sobre a vida dos cientistas, contribuindo para uma nova visão da ciência e dos cientistas, dando maior motivação para o seu estudo.

É interessante observarmos também os estudos que exemplificam a utilização de episódios históricos, para compreensão da e sobre a Ciência (SILVA, 2006; FORATO, 2009; SILVEIRA, 2010). Eles nos oferecem resultados positivos quanto à utilização deste tipo de abordagem nas salas de aula e a sua eficácia na compreensão de aspectos relacionados ao processo de construção do conhecimento científico, além de mostrar uma possibilidade de proporcionar um ambiente escolar em que o mecanismo de ensino, a prática adotada pelo professor permite que sejam apresentadas ideias divergentes acerca de um mesmo fenômeno (controvérsia de teorias).

Com base nisso, a proposta do nosso trabalho é oferecer respostas aos seguintes questionamentos: é possível ir além do material didático tradicional e apresentar conceitos físicos a partir dos elementos identificados em uma controvérsia científica? A análise destes elementos pode levar à compreensão de alguns aspectos da natureza da ciência? Qual a importância de destacar aspectos científicos e extracientíficos na abordagem de um episódio histórico?

Diante disso, o nosso estudo objetivou-se em abordar o Princípio de Ação Mínima numa perspectiva histórica, identificando e analisando os elementos que caracterizam a controvérsia existente em torno do conceito de ação e da sua minimização. Para tanto, foram observados aspectos relacionados à prevalência de teorias, aos contextos histórico, social e político da época, às relações de poder entre os personagens, às alianças científicas entre eles, isto é, os aspectos que permitem ao aluno compreender o processo de construção do conhecimento científico, isto é, a sua natureza.

O que se pretende é levar à sala de aula conceitos físicos sob uma perspectiva que ultrapasse a reprodução de equações matemáticas, enfatizando o papel dos estudiosos envolvidos na sua elaboração e os fatores que contribuíram para a construção da ciência ao longo do tempo. Dessa forma, escolhemos um episódio histórico envolto de disputas, do

qual participaram vários personagens importantes para o cenário do desenvolvimento científico da época. As características deste episódio nos permitem observar que o conhecimento científico se apresenta como processo histórico, em contínua transformação, pois à medida que consideramos informações relevantes sobre a vida dos personagens, o ambiente cultural, as teorias alternativas envolvidas no episódio, identificamos a sua associação a outras formas de expressão e produção humanas.

O trabalho ainda se justifica pelo fato de poucos professores nos cursos de Licenciatura em Física oferecerem espaço em suas disciplinas aos estudos da Mecânica Analítica, muito menos ao desenvolvimento de seus conceitos. Apenas alguns alunos e professores conhecem o desenvolvimento do conceito de ação mínima, no entanto são capazes de demonstrar a equação de Euler-Lagrange “de olhos fechados”. De uma maneira geral, a História da Ciência não está inserida no contexto do ensino superior, em suas disciplinas, nas discussões estabelecidas nas disciplinas de Física, por exemplo. Isso se explica, por um lado, pelo fato dos professores não possuírem formação para fomentarem tais discussões ou, simplesmente, por não compreenderem a importância da abordagem histórica, permeada pelo contexto social no qual se insere os conceitos que apresentam.

Além disso, uma justificativa pertinente, senão a mais importante, encontra-se na escolha do tema e, na literatura atual, poucos trabalhos se voltarem para a orientação e elaboração de sequências didáticas direcionadas ao ensino superior. Em nossa consulta às propostas educacionais elaboradas para o ensino de Física, não encontramos nenhum material que contemplasse essa temática, com a intuito de apresentá-lo em sala de aula, assumindo caráter didático, nas aulas dos cursos de Licenciatura em Física. Assim, a temática apresentada representa uma escolha que confere caráter inédito à discussão apresentada nesta pesquisa, tendo em vista que tanto a abordagem, quanto o material elaborado para tal, são pioneiros nesse tema, sem esquecer o público para o qual se direciona. A elaboração de Sequências Didáticas voltadas para os professores dos cursos de Licenciatura em Física é um trabalho que indica avanço considerados discretos.

No tocante à importância da escolha deste tema, apresentar o processo de construção da teoria deste Princípio, no curso de Licenciatura em Física, se faz relevante, pois, segundo Martins & Silva (2007b):

durante o século XIX, o princípio de ação mínima é considerado como uma das leis fundamentais da física. Tendo surgido na mecânica, passou depois a ser aplicado ao eletromagnetismo, à teoria da relatividade e à teoria quântica. (...) Sua versão mais antiga é atribuída a Pierre-Louis de

Maupertuis (1698-1759) que introduziu um princípio de mínimo na óptica e na mecânica. Na mesma época ganhou um formalismo matemático mais adequado nos trabalhos de Leonhard Euler (1707-1783) e, posteriormente, nas obras de Lagrange (1736-1813) e de Hamilton (1788-1856), adquirindo no século XIX a forma atualmente adotada. (MARTINS& SILVA, 2007b, p. 147)

Os conceitos de ação têm seus antecedentes na Antiguidade, mas a utilização e formulação de seu princípio de minimização têm como principal precursor Pierre Louis de Maupertuis (1698-1759), muito embora a autoria deste princípio seja um episódio obscuro e impregnado de interesses e interessados. Em meados do século XVIII, Samuel König contestou a autoria do princípio de Maupertuis e ganhou adeptos à sua opinião, assim como vários inimigos. As disputas em torno desse acontecimento envolveram vários membros da Academia de Ciências de Berlim, a exemplo de Voltaire, Jean le Rond d'Alembert, Leonhard Euler e o próprio Rei Frédéric II, o rei da Prússia e diretor da Academia de Ciências na época. Além disso, causaram desacordos, rompimento de antigas alianças e a publicação de várias críticas aos trabalhos do então precursor do Princípio, Maupertuis.

A controvérsia existente em torno deste princípio se sobressai diante de outras tão estudadas na História da Ciência, a exemplo da controvérsia acerca do comportamento da luz¹, porque apresenta aspectos controversos tanto no âmbito epistêmico, utilizando a denominação de McMulin citado por Brante & Elzinga (1990) e Narasimhan (2001) quanto os relacionados aos aspectos externos ao debate, aqueles denominados de não-epistêmicos.

No caso da controvérsia em torno da natureza da luz, ela é predominantemente epistêmica, segundo os estudos de Brante & Elzinga (1990) e Narasimhan (2001), ou seja, havia uma forte divergência de teorias baseadas em hipóteses devidamente elaboradas na tentativa de explicar melhor o fenômeno luminoso. Além da controvérsia de teoria, havia elementos extracientíficos presentes na disputa, no entanto, eles não justificam a força de um ou outro grupo de pesquisadores no sentido de oferecer evidências que determinem o desfecho da disputa, pelo menos nas discussões presentes na literatura atual. No caso do

¹ A discussão acerca da natureza da luz, durante o século XVIII, teve como personagens principais, os adeptos da teoria ondulatória, representada por Christiaan Huygens (1629 -1695), e da teoria corpuscular, tendo como um dos personagens principais, Isaac Newton (1642 -1727). Esse desacordo não assume as mesmas características da controvérsia estudada, uma vez que a divergência de ideias não gerou conflitos diretos em uma mesma época, além disso, as duas teorias coexistem e são utilizadas para explicar os fenômenos sob diferentes perspectivas.

Princípio de Ação Mínima, os elementos encontrados na controvérsia, tanto os epistêmicos quanto os não epistêmicos, ou extracientíficos, como veremos no Capítulo 4, são determinantes para aceitação das ideias de um grupo ou de outro.

A hipótese que sustenta a tese desse estudo é de que uma abordagem histórica do episódio do Princípio de Ação Mínima e as controvérsias em torno do mesmo, são capazes de apresentar aos alunos dos cursos de Licenciatura em Física os conceitos de ação mínima, e as teorias que lhe serviram de alicerce, como sendo produto da contribuição de vários personagens, desde as ideias de mínimo da antiguidade (a exemplo de Heron de Alexandria) até as contribuições presentes no século XVIII.

Um estudo histórico favorece o conhecimento do contexto científico da época, no qual se situavam as ideias dos personagens envolvidos na disputa, apresentando as correntes antagônicas e mostrando a importância de cada uma delas na construção deste novo princípio de mínimo. Além disso, permite analisar os aspectos que caracterizam a controvérsia conferindo a eles o grau de influência no seu desfecho.

A riqueza de eventos que permeiam a discussão sobre a autoria deste princípio, bem como a validade das ideias dos seus representantes, é notória a partir da análise documentação da época. Os elementos identificados através de escritos datados da época, permitem a investigação das influências sofridas por todos os personagens envolvidos, além das implicações de tais influências. Este estudo resultou neste trabalho, no qual discutimos o episódio, suas características enquanto controvérsia e aspectos referentes à compreensão da natureza da ciência.

A partir desse trabalho, foram elaborados três produtos educacionais. O primeiro, um módulo didático dividido em duas partes, sendo a primeira intitulada *Princípio de Ação Mínima e sua aplicação à óptica*, e a segunda parte, com título *Princípio de Ação Mínima e sua aplicação à colisão dos corpos e ao equilíbrio das alavancas*. Este primeiro produto compreende o panorama histórico que antecede o ano das publicações de Maupertuis e o que é discutido em cada um dos seus trabalhos, sendo a primeira parte referente ao trabalho de 1744 e a segunda, referente ao trabalho de 1746.

O segundo produto compreende um material áudio visual, no qual são abordados os aspectos extracientíficos que permeiam o desenvolvimento do Princípio de Ação Mínima. O terceiro e último produto, as Sequências Didáticas, acompanham o primeiro com o objetivo de orientar o professor no Ensino Superior na utilização do material fornecido no primeiro produto. Dessa maneira, foram abordados alguns conceitos sob uma perspectiva

histórica, apresentando os principais personagens, o cenário que dá vida às disputas, as correntes de pensamento e seus representantes, evidenciando assim as alianças, rompimentos, etc.

Para fins metodológicos, dividimos a dissertação em 7 Capítulos. O Capítulo 2 traz uma discussão da fortuna crítica acerca da utilização da História da Ciência no ensino de Ciências, passando pela formação de professores e, rapidamente, apresentando como as diretrizes que compõem os PCNs favorecem o uso da HC no ensino. Ainda neste capítulo exploramos as vantagens da utilização de episódios históricos no ensino de Ciências, a partir de controvérsias científicas.

No Capítulo 3, apresentamos uma discussão teórica sobre controvérsias científicas. Para isso nos utilizamos das teorias de Brante & Elzinga (1990), Machamer et al (2000) e Narashiman (2001) abordando a conceituação do termo, a classificação presente na literatura, os fatores que podem influenciar no andamento de uma controvérsia, as possíveis abordagens, dentre outros aspectos. Para além das discussões teóricas, apresentamos a justificativa de sua utilização no ensino de Ciências.

O episódio estudado é apresentado no Capítulo 4. Neste foram analisados os dois artigos de Pierre Louis de Maupertuis (1698-1759), tomando por base algumas leituras críticas e as obras originais do autor.

No Capítulo 5 está descrita a metodologia da pesquisa. Tanto no que diz respeito à sequência adotada (realização dos estudos teóricos, construção dos produtos educacionais, etc.), quanto às estratégias utilizadas para a elaboração dos produtos, explicitando as etapas do processo, explicando no que consiste cada um deles.

No Capítulo 6 escrevemos a análise da controvérsia estudada, destacando seus principais pontos e os aspectos da Natureza da Ciência que podem ser identificados durante o episódio, principalmente no tocante aos aspectos extracientíficos.

O sétimo capítulo é destinado às últimas considerações feitas a respeito do trabalho, expondo seus resultados, seguidos de uma discussão que destaca a abordagem proposta como uma alternativa viável às salas de aula dos cursos de Formação de Professores, nas quais se pretenda utilizar a História da Ciência para a apresentação de conceitos via Episódios Históricos. Além disso, esta pesquisa nos permite observar que, partindo de episódios históricos, é possível discutir aspectos da natureza da Ciência, em particular aqueles relacionados à possibilidade de desacordos no processo de elaboração de conceitos, ao fato de a natureza não oferecer evidências simples para que seja interpretada

sem ambiguidades e, principalmente ao papel da influência dos contextos social, econômico, político e histórico no desenvolvimento da ciência.

Finalmente, nos Apêndices² estão disponíveis os produtos mencionados.

² Os Apêndices deste trabalho estão disponíveis em <https://drive.google.com/folderview?id=0BzSXIKxOH5CUQm1HeWoxQ21NNU0&usp=sharing> para download. Neste endereço, o leitor poderá encontrar além dos produtos elaborados, os materiais sugeridos nas Sequências Didáticas.

2. A HISTÓRIA DA CIÊNCIA E O ENSINO DE CIÊNCIAS

O Ensino de Ciências pelo viés da utilização da História da Ciência é um discurso que perdura por décadas. A introdução de conceitos a partir da História e Filosofia da Ciência é um bom caminho para o ensino de ciências se a meta dos cursos superiores é formar cidadãos críticos com formação cultural ampla, que compreenda a evolução do nosso entendimento de mundo, uma vez que a partir da História da Ciência é possível conhecer a natureza da mesma (MARTINS, 1990, p. 2).

Em seu ensaio *A estrutura das revoluções científicas*, Kuhn (1962, p. 20) apresenta a ciência como “a reunião de fatos, teorias e métodos reunidos nos textos atuais”, em seguida atribui aos cientistas o sucesso ou insucesso na contribuição de um ou outro elemento que compõe o processo gradativo de construção do conhecimento científico. Com isso, a “História da Ciência torna-se a disciplina que registra tanto esses aumentos sucessivos como os obstáculos que inibiram a sua acumulação” (Idem) e o historiador possui duas tarefas principais: determinar o período e os autores de cada teoria, e descrever e explicar os erros, mitos, superstições que caracterizam estes obstáculos e impedem a construção da ciência.

Essa tentativa de aproximação da ciência com a história e filosofia da ciência é apresentada por Matthews (1995, p. 165), não como uma panaceia, nem como um remédio universal para todos os males presentes nas salas de aulas de Ciências, mas se configura numa forma de humanizá-las, aproximá-las aos interesses pessoais e éticos, dando significado ao ensino de ciências. Dessa forma, as aulas adquirem um caráter reflexivo, levando o aluno a questionar a Ciência apresentada.

A humanização também pretende atingir a parcela de alunos que não se identificam com outras formas utilizadas pelos professores para a compreensão da ciência, como por exemplo, as atividades experimentais. Assim, o ensino das Ciências a partir da História e Filosofia da Ciência, e ainda das controvérsias envolvidas na aceitação de determinadas teorias, se caracterizam numa tentativa de aproximação com os interesses dos estudantes. Isso permite oportunizar um entendimento mais integral da ciência e a formação de um aluno mais crítico e menos preso a concepções que limitam a sua visão de ciência (MATTHEWS, 1995, p. 165).

Pietrocola (2005, p. 157-158) afirma que a proposta de humanização da ciência contribui para dar significado às equações utilizadas para descrever os fenômenos físicos,

mostrar que o pensamento científico evolui, dando às aulas um caráter investigativo, que desmistifica o método científico, entre tantas outras contribuições. Deste modo, as pesquisas sempre procuram divulgar formas para que essa inserção de fato ocorra e que os alunos, sejam eles do ensino básico ou do superior, consigam aprender os conceitos envolvidos na história apresentada em sala de aula.

2.1 A abordagem histórico-social e a formação de professores

A busca pela educação científica justifica a tentativa de trazer às aulas de ciências o estudo da ciência e sobre a ciência. Nesse sentido, estudar sobre a ciência implica em compreender aspectos de sua natureza, do processo e construção do conhecimento científico, o conjunto de seus métodos, e de tudo o que favorece o seu desenvolvimento.

É conveniente citar que, dentre as cinco competências essenciais descritas nas Diretrizes Nacionais Curriculares para os Cursos de Física, “desenvolver uma ética de atuação profissional e a consequente responsabilidade social, compreendendo a Ciência como conhecimento histórico, desenvolvido em diferentes contextos sócio-políticos, culturais e econômicos” (BRASIL, 2001, p. 4) justifica a utilização de elementos da História da Ciência para a compreensão de sua natureza e da evolução do conhecimentos atrelados a ela, aplicados ao Ensino de Física, quando se pretende que o aluno seja capaz de estabelecer uma relação entre a compreensão de conceitos desta ciência e o seu local de desenvolvimento na história e na sociedade. Dessa maneira, os professores em formação são capazes de entender como a ciência sofre implicações diretas dos contextos social e político das épocas em que determinados estudos foram realizados. Além disso, a forma como essas interferências, positivas ou não, contribuem para a elaboração e aceitação ou rejeição de teorias e suas justificativas foram elaboradas.

É nessa perspectiva que muitos pesquisadores da área pretendem que a formação de professores em ciências contemple uma abordagem da ciência, voltada para seu contexto sócio-histórico, sendo possível, por exemplo, através do estudo de episódios históricos sob o viés da História e Filosofia da Ciência. (MARTINS, 1990; MATHEWS, 1995; SILVA, 2006; FORATO, 2010). Como fruto de um estudo voltado ao trabalho de professores na educação básica, podemos citar o Currículo Nacional Britânico de Ciências, que como argumenta Pumfrey (1991, p. 63) permitiu a implementação do AT17 nesse currículo. No tocante ao elaborado pela Associação Norte Americana para o Progresso da Ciência, temos

o Projeto 2061, de 1990, que também dava nova direção ao estudo da ciência tendo a perspectiva histórica como componente central; sem esquecer o bem sucedido Projeto Harvard.

Apesar da mudança no panorama das implicações sociais da ciência na população mundial, por exemplo, os acontecidos em Hiroshima e Nagasaki, os embates em torno dos armamentos bélicos em vários países orientais, as discussões acerca da valorização da vida (aborto, células tronco, eutanásia, etc.), não se observa uma mudança na perspectiva de formação dos alunos e dos professores, a nível Brasil. O que antes se configurava na busca de formar cientistas que estivessem aptos a contribuir com a nação no sentido de dar prosseguimento às pesquisas nas áreas da biologia, física, química e tantas outras ciências, ou atender uma demanda de “produção” de futuros trabalhadores com habilidades satisfatórias para atuarem nas áreas tecnológicas, hoje deveria dar lugar à tentativa de estimular o senso crítico dos professores em formação. Reflexo disso seriam profissionais preocupados e conscientes das discussões que envolvam a ciência num processo contínuo de transformação, de instabilidade que pode oportunizar a compreensão de conceitos e teorias evoluindo, sofrendo rupturas, o que se caracteriza como um aspecto próprio da natureza da ciência.

O professor em formação deve, entre tantas outras competências, reconhecer as relações do desenvolvimento da Física com outras áreas do saber. Assim, tendo em sua formação inicial estudos voltados à compreensão da natureza do conhecimento científico, o estudante do curso de graduação incorpora à Física a História, enquanto disciplina componente do currículo da instância na qual será professor (escola básica, inicialmente), identificando seus marcos e momentos descritos por ela como parte do *locus* dos estudos e dos personagens envolvidos nas discussões sobre o conhecimento da ciência Física.

Para além dos estudos e da dedicação à ciência pelo viés histórico, a formação de professores de física, segundo o documento orientador para os cursos de Licenciatura em Física, propõe nas suas competências:

1. o planejamento e o desenvolvimento de diferentes experiências didáticas em Física, reconhecendo os elementos relevantes às estratégias adequadas;
 2. a elaboração ou adaptação de materiais didáticos de diferentes naturezas, identificando seus objetivos formativos, de aprendizagem e educacionais.
- (BRASIL, 2001, p. 5)

A atividade de elaboração de materiais didáticos é parte integrante do fazer do professor. Diante da possibilidade de trabalho com a HC, isto viabiliza também a

elaboração de materiais dessa natureza, se constituindo como um ponto marcante nestes cursos, tendo em vista que esta é uma tarefa pouco realizada neste campo, devido à carência na formação destes profissionais, por exemplo.

O fortalecimento desta ideia oferece ao ensino de Física a oportunidade, através de uma nova metodologia, de confecção de materiais de apoio, visando sempre tanto uma formação mais completa aos estudantes de licenciatura, quanto à aplicação destes elementos no ensino básico para onde se destinam os estudantes, futuros professores.

No que se diz respeito à formação inicial, segundo Malucelli (2007, p. 114), é possível identificar que a formação inicial carrega uma certa preferência e responsabilidade muito maior quanto os estudos e pesquisas realizados durante a formação complementar. Isso porque acredita-se que nesta primeira, o professor em formação tem sua verdadeira carga de conhecimento e nela é capaz de adquirir seus atributos de professor; enquanto que a outra serve apenas para reparar algum erro que ficou do início. Se esta primeira formação deve ser tomada em lugar de destaque, é preciso que a mesma contemple o máximo de competências a serem desenvolvidas pelos licenciandos, no caso das Licenciaturas, para que o mesmo seja capaz de efetivar a sua prática, sem grandes problemas.

Contrariando essa opinião, faz-se necessário apontar, que, na maioria dos cursos de Licenciatura em Física no Brasil, a disciplina de História da Ciência, voltada para o Ensino da Física não é contemplada no seu currículo. Tendo isso como fato, a formação inicial já apresenta uma falha (que, quando do interesse próprio do estudante, é reparada em cursos de extensão ou somente na sua formação continuada). Como afirmar que um discente em formação tem uma formação completa, se sequer tem contato com as metodologias e abordagens voltadas à compreensão da Ciência e sua natureza? Dessa maneira, um currículo com ênfase do indivíduo como explicador (self as explainer), utilizando a nomenclatura de Roberts, apontada em MOREIRA (1986, p.70) não se faz possível.

Segundo o estudo de MOREIRA (2007), o ensino de ciências e o seu currículo devem ser planejados, de tal modo que o currículo contemple não somente aspectos instrucionais, mas vá além do que se pretende conceitualmente, seja abrangente no sentido de comunicar a ciência dando significado ao seu estudo, respondendo questões semelhantes à “Por que estou aprendendo ciência?”, até para que funcione em consonância com as Diretrizes mencionadas pelo menos autor. (Ibid., p. 69)

No tocante à abordagem da História da Ciência, a Física, como é o caso deste trabalho, deve ser compreendida como uma das expressões das muitas capacidades

humanas. Assim, o professor em formação, neste momento caracterizado com um estudante, torna-se capaz de se identificar como parte desse processo e capaz de enxergar suas concepções, suas opiniões, sua maneira de interpretar os fatos estudados, como válidos. “No caso da Física, por exemplo, ao longo de sua história, instrumentos, indivíduos, suposições e teorias em desenvolvimento provêm um veículo ideal para que jovens examinem como se faz uma ciência” (Ibid, p. 70).

Contrariamente a este tipo de proposta, é comum tomarmos conhecimento de que o currículo nos cursos de Licenciatura em Física, apresenta abordagens nas quais a ciência ou é produzida por meio de teorias que são explanadas em componentes teóricos, ou é fruto de evidências experimentais, sujeitas ao erro, mas sempre com a exatidão no final, do modo como é apresentada nos laboratórios. Como nos indica El-Hani (2006, p. 4), devemos tomar consciência de que não basta inserir o aluno e os professores em atividades que simulem a atividade científica, nas quais se conheça o processo de investigação identificando um método científico fechado, pronto para ser aplicado em qualquer problema identificado nesse processo. A prática científica deve ser compreendida nos seus contextos histórico, social, cultural e a pesquisa deve ser conferido o devido tratamento das dimensões históricas e filosóficas, para que assim, o discurso científico seja internalizado.

Sabendo que este será o professor que aplicará o conhecimento adquirido nos Institutos das Universidades, na Educação Básica, se faz necessário, até para que atenda fundamentos descritos nos documentos orientadores, a exemplo dos PCNs, seu preparo para o exercício da cidadania e sua qualificação para o trabalho a fim de que explorem de seus alunos competências e habilidades relacionadas ao contexto social, cultural e histórico do desenvolvimento da ciência estudada. É com base nisso, que a abordagem histórica pode viabilizar a compreensão do conhecimento científico e sua natureza. Embora ainda se configurem como adequações, sem um tratamento sistemático, é oportuno conscientizar os professores em formação que o conhecimento da ciência e sobre a ciência que deverá se apropriar, deverá contemplar um estudo voltado aos contextos antes mencionados, o social, cultural e histórico:

A Física percebida enquanto **construção histórica**, como **atividade social humana**, emerge da cultura e leva à compreensão de que modelos explicativos não são únicos nem finais, tendo se sucedido ao longo dos tempos [...] O surgimento de teorias físicas mantém uma relação complexa com o **contexto social** em que ocorreram. Nesse sentido, deve ser considerado o desenvolvimento da capacidade de se preocupar com o todo social e com a cidadania. Ao mesmo tempo, devem ser promovidas as competências necessárias para a avaliação da veracidade de

informações ou para a emissão de opiniões e juízos de valor em relação a situações sociais nas quais os aspectos físicos sejam relevantes (BRASIL, 1997, p. 27) (grifos nossos).

Embora este discurso esteja presente na literatura sobre o assunto há décadas, no Brasil, os documentos orientadores para o Ensino de Ciências no Ensino Superior não contemplam esta abordagem. Não é possível fundamentarmos legalmente no sentido de saber o que se pretende nos cursos de Ensino Superior quanto à Ciência Física, quando do ensino para compreensão da Natureza, senão por meio de artigos escritos na área. Estudar HFC e apresentar conceitos numa perspectiva histórica, exige dos professores um dispendioso tempo e a busca e, conseqüentemente, a elaboração de materiais próprios para o uso nos cursos de formação. Isto para que não produza um trabalho negativo no sentido de socializar aspectos errôneos e favorecer as concepções ingênuas da ciência, como cita Gil-Peréz (2001).

Na tentativa de contribuir para a resolução de apenas um dos problemas relativos à inserção da História da Ciência ao ensino de Física, o nosso intuito é apresentar como é possível alcançar bons resultados, a partir da elaboração de um material didático, baseado na reconstrução de um episódio histórico e sua análise, a fim de oferecer subsídios para a melhoria das concepções dos alunos dos cursos de formação de professores de Física.

Embora a abordagem de conceitos pelo viés da História da Ciência venha ganhando espaço gradualmente, ainda é preciso suprir uma carência quanto à formação dos professores de Física, o que acarreta na utilização de materiais com qualidade comprometida e, muitas vezes, na elaboração de materiais com uma qualidade que deixa a desejar. É de nosso interesse enveredar por essa área, introduzindo o conhecimento científico na dimensão histórica em todos os níveis do ensino, porém para isso, é preciso formar bem os alunos dos cursos de formação de professores, a fim de que não se difunda uma ciência caracterizada como estável, fechada, produto de mentes geniais, desvinculadas da realidade na qual se desenvolve, etc.

2.2 O uso de episódios históricos e o papel das controvérsias científicas na compreensão da natureza da ciência

Compreender que a natureza é interpretada de maneira diferente por cada um de nós, que fazemos a ciência, é aceitar que para o estabelecimento de cada ideia na

comunidade científica, desacordos são possíveis e cada pesquisador carrega consigo os seus juízos, suas crenças, suas convicções e tenta ser coerente o máximo possível com aquilo que acredita. Muitos conflitos, ao longo da história da ciência, podem evidenciar essas afirmações, como as diferentes interpretações sobre a eletricidade no século XVIII, as diferenças conceituais entre a eletricidade animal e a eletricidade comum da condução dos metais de Galvani e Alessandro Volta, as concepções acerca da natureza da luz e seus adeptos, entre tantos outros. (MARTINS, 1986;1999; SILVA, 2008; FORATO, 2011).

O estudo dos episódios históricos nos oferece respaldo para que compreendamos quais os pontos convergentes e divergentes das teorias que os protagonizam. Além disso, nos capacita olhar criticamente, sem anacronismo, para as ideias de cada personagem. Dessa maneira, é possível traçar o nosso perfil de pesquisador e elaborar nossas críticas e possíveis conclusões acerca do fenômeno observado, discutindo argumentos, percebendo pontos de discordância destas ideias, verificando a autenticidade da elaboração e do manuseio de atividades utilizadas para a validação ou refutação de uma teoria, por exemplo.

O uso de episódios históricos para a compreensão das aspectos teóricos envolvidos no mesmo, considerando aspectos que foram relevantes para o seu estabelecimento, permite ao aluno perceber também que a divisão da ciência em 'áreas' se configura apenas numa questão prática e, muitas vezes, a ciência Física, por exemplo, pode estar relacionada à matemática não somente pela utilização de equações. Nas palavras de Martins:

Ela serve para contrabalançar os aspectos puramente técnicos de uma aula, complementando-os com o estudo de aspectos sociais, culturais e humanos. Informações (preferivelmente bem fundamentadas) sobre a vida dos cientistas, a evolução de instituições, o ambiente cultural de uma época, as concepções alternativas do mesmo período, as controvérsias e dificuldade de aceitação de novas ideias, tudo isso pode contribuir para dar uma nova visão da ciência e dos cientistas, dando maior motivação para o estudo (MARTINS, 1990, p. 3).

No entanto, embora a história da ciência tenha ganhado espaço considerável tanto no ensino superior quanto na educação básica, conduzir as aulas de ciências usando esses elementos não é tarefa trivial. É fundamental entender que ainda existem obstáculos que, uma vez não superados, podem surtir o efeito contrário.

Segundo Martins (2006, p. xvii-xviii), existem três barreiras principais para que o uso da HFC se desempenhe efetivamente, são elas:

i) a carência de professores com formação adequada nessa área, ou seja, infelizmente poucos professores brasileiros saíram em busca de boas fontes na área e ainda há poucas pós-graduações dedicadas a esse estudo. Isso abre um precedente: algumas pessoas, sem formação adequada, fazem o uso de materiais precários e, conseqüentemente, transmitem uma visão completamente deformada da história da ciência:

ii) a falta de material didático adequado para sua aplicação no ensino. Novamente o problema da busca de boas fontes pode ser evidenciado aqui. No Brasil, isto é, em português, existem muitos livros que discorrem sobre a evolução das ideias da física, porém em poucas páginas os autores conseguem contemplar séculos de desenvolvimento na ciência. Essa relação de proporcionalidade apresenta uma discrepância. São poucos os pesquisadores interessados em História da Ciência que se debruçam nas obras primárias dos estudiosos, responsáveis pela construção da ciência que hoje conhecemos. Por isso, muitos estudos históricos vêm se desenvolvendo na tentativa de superar esse problema. (MARTINS, 2006b; SILVA, 2008; FORATO, 2009; SILVEIRA, 2010) Hoje já é possível encontrar materiais didáticos voltados ao Ensino de Física que oferecem uma abordagem contextual de qualidade³.

iii) as ideias equivocadas sobre o uso da história da ciência na educação sendo consequência dos dois primeiros problemas apresentados. Trata-se de atribuir ao ensino da História da Ciência informações isoladas sobre determinados estudos que priorizam apenas os grandes personagens, a localização pontual de eventos ou episódios marcantes, com datas determinadas e que, por isso, cada fato, cada “descoberta” pode ser estudada isoladamente. A concepção de grandes gênios também facilita a utilização dos chamados argumentos de autoridade, com os quais muitos professores impõem a certeza científica como crença. Por fim, a ciência é vista como simples e baseada apenas no empirismo. Dessa maneira acredita-se que toda investigação científica deve haver um método científico indutivista que se baseia exclusivamente na observação e nos experimentos como prova de determinadas teorias.

A deturpação da história da ciência, através de sua simplificação, por exemplo, pode tornar esse recurso completamente inútil e prejudicial ao ensino de ciências. Conhecer os processos pelos quais o conhecimento científico passou teoria após teoria, as mudanças conceituais e as revoluções de paradigma são de fundamental importância tanto

³ A coleção de livros didáticos *Física em Contextos* (PIETROCOLA, 2011) é um exemplo de obra que aborda a ciência Física numa perspectiva histórica, que tem sido adotada por muitas escolas em todo Brasil.

para uma desmistificação das aulas de ciências como para compreensão de concepções intuitivas, derivadas do senso comum do aluno.

Desse modo, é possível também evidenciar a posição do pesquisador e a sua falibilidade, isto é, os responsáveis pelo desenvolvimento de qualquer teoria que seja, nunca estiveram totalmente certos, nem errados em suas aferições, eles simplesmente elaboram julgamentos complexos, que muitas vezes são vagos, sem fundamentação na sua própria teoria,

[Eles] Formulam hipóteses ou conjecturas a partir de ideias que podem não ter nenhum fundamento, baseiam-se em analogias vagas, têm ideias preconcebidas sem fazerem qualquer observação e experimentos, constroem teorias provisórias que podem ser até mesmo contraditórias, defendem suas ideias com argumentos que podem ser fracos ou até irracionais (MARTINS, 2006, p. xix).

Um dos propósitos fundamentais que justificam a utilização das fontes históricas para tal é o de levar os alunos a refletir criticamente acerca do método científico de investigação da ciência realizado pelos pesquisadores, uma vez que esta é uma das visões deformadas da ciência mais recorrente entre os professores de ciências. Dessa maneira, é possível estabelecer clareza conceitual e as diferenças entre observações e hipóteses, leis e explicações e experimentos e teorias (PUMFREY, 1991, p. 61).

Outra evidência dos resultados positivos que podem ser alcançados a partir do uso dos episódios históricos, como objeto de uma análise a fim de ensinar ciência e sobre a ciência, é que eles podem ser estudados por meio da abordagem do tipo contextualista. Segundo El-Hani (2006), nesta abordagem são considerados todos os contextos nos quais a pesquisa científica esteve envolvida. Esse tipo de abordagem considera fatores externos, como os contextos religioso, cultural, filosófico, as relações de poder intrínsecas à vida de cada pensador. Perceber e considerar tais contextos é compreender que eles não devem ser desprezados, pois influenciam diretamente na concretização de uma teoria, sua aceitação perante a comunidade. São aspectos não cognitivos ou extracientíficos que trazem considerações acerca de um momento histórico e não poderão ser desconsiderados ao tratarmos de divergências conceituais, de observações experimentais ou do estudo dos escritos desses personagens.

O conhecimento físico deve ser apresentado como processo histórico, em contínua transformação e associado a outras formas de expressão e produção humana. Por isso, considerar informações relevantes sobre a vida dos personagens, o ambiente cultural e as

teorias alternativas envolvidas no episódio, são elementos convidativos e atraem a atenção dos alunos para o estudo, uma vez que localizam os feitos científicos e os respectivos cientistas no tempo e no espaço. Em particular, aqueles estudos de episódios históricos envolvendo controvérsias, pela riqueza de aspectos com esse caráter, permitem abordar, a partir destes, vários aspectos relevantes sobre a natureza da ciência.

Essas características podem ser melhores estudadas a partir da análise de episódios nos quais se desenvolvem algum tipo de controvérsia científica. Segundo Reis & Galvão (2009, p. 11), embora a construção da ciência se dê baseada na existência de controvérsias, evoluindo através do rompimento de paradigmas, nem os livros didáticos nem as escolas a representam assim. Neles, a ciência é retratada como coerente, objetiva, não problemática e claramente distinguível de atividades não científicas.

O uso das controvérsias científicas quanto às considerações cognitivas, da abordagem internalista, permite a verificação de que uma evidência experimental, assim como a simples observação de um fenômeno natural, pode oferecer diferentes interpretações aos seus observadores. Ou seja, a imagem deformada de que a natureza oferece apenas evidências que são constatadas a partir de teorias únicas e verdadeiras é completamente desconstruída. Isso é o que Pumfrey (1991, p. 66) denomina “flexibilidade interpretativa”, um dos conceitos-chaves que deram ao currículo britânico mais uma evidência da eficácia do uso das diferenças históricas e as suas várias interpretações.

Além de perceberem a ambiguidade na interpretação da natureza a partir das teorias e dos personagens responsáveis pelo desenvolvimento da ciência, os próprios alunos e professores devem se conscientizar da sua capacidade de formular suas explicações, apontando evidências particulares para justificar a teoria alternativa defendida por eles.

2.3 A compreensão da natureza da ciência

Compreender a ciência e o seu desenvolvimento, demanda um conhecimento sobre alguns aspectos de sua natureza. Muitos autores enunciam opiniões sobre o que seria, de fato, a natureza da ciência, o que nos indica que não existe uma conceituação única e fechada, principalmente porque não se pretende chegar a um método, desconsiderando a complexidade e a dinâmica natural da ciência. O que se verifica na literatura vigente é que, embora existam várias opiniões sobre o que é de fato a natureza da ciência, há um consenso geral que pode ser tomado como referência.

Antes de elencar os parâmetros que servem de caracterização da natureza da ciência no processo de construção do conhecimento científico, é importante conhecermos que tipo de concepções os professores de ciências possuem. Seria óbvio assumir que os professores em formação, e, principalmente os já formados, não apresentassem erros nas suas concepções acerca de sua natureza. Entretanto, não é isso que se observa. Estudos como os de Gil Pérez (2001) e o de El-Hani (2006) apontam a predominância das concepções ingênuas acerca da natureza da ciência na formação da maioria dos professores.

Na tentativa de compreender que tipo de concepções eram apresentadas por um grupo de professores alvo de sua pesquisa, Gil Pérez (2001) conseguiu identificar em um grupo de professores em formação inicial e continuada, deformações conjecturadas que se repetiam entre eles e, curiosamente, com a mesma frequência. Algumas dessas deformações acerca do trabalho científico são:

A concepção *empírico-indutivista*, que atribui o papel neutro a toda observação, sem a influência de ideias anteriores, hipóteses orientadoras, teorias disponíveis, etc. Observa-se que, dessa maneira, a ciência é construída a partir de descobertas ao acaso, como se costuma observar na televisão, nas histórias em quadrinhos voltadas à área ou nas revistas e em documentários.

Em seguida é identificada a *visão rígida, infalível e algorítmica* do modo como se constrói o conhecimento científico. Esta se resume ao fato de apresentar um método científico com um conjunto de etapas a seguir mecanicamente, no qual o controle dos resultados é absolutamente rigoroso, a fim de priorizar os resultados positivos, o que se distancia ainda mais da incerteza do trabalho científico. Quanto à essa concepção ingênuo vale lembrar a análise dos dados realizados em disciplinas experimentais, nas quais quanto menor o erro encontrado nas medidas realizadas, melhor é a reprodução da realidade científica promovida pelas observações experimentais.

A terceira visão, a *aproblemática e ahistórica* apresenta a dificuldade de enfatizar que qualquer conhecimento é o produto de algum questionamento, é responsável por resolver algum tipo de problema que oferece inúmeras dificuldades para ser resolvido. Arelada a essa visão, podemos nos referir a visão distorcida da ciência *descontextualizada, socialmente neutra*, que tratam os cientistas como seres que estão acima do bem e do mal, seres que não estão inseridos em um contexto social. Nesta visão são desconsideradas as relações entre a ciência e a sociedade, algo que hoje já é apresentado com maior frequência

nos meios de comunicação (problemas ambientais, impasses relacionados à valorização da vida, etc.).

As visões *analítica e cumulativa* se relacionam no sentido de que, tratar a evolução da ciência como isenta das crises, das remodelações, que cresce linearmente, favorece o seu retalhamento e sua simplificação, a partir do parcelamento dos estudos.

Por fim, a visão mais comum, a *visão elitista e individualista* com a qual o conhecimento científico aparece como produto de gênios, que não trabalham coletivamente e apenas uma pessoa ou um único grupo delas é capaz de lançar hipóteses, refutá-las, confirmá-las e construir um conhecimento sem a contribuição de seus pares.

Então, na tentativa de evitar essas concepções errôneas e ingênuas do processo de investigação científica, alguns autores apresentam que, em síntese, a natureza da ciência compreende todos os elementos que constituem o processo de elaboração do conhecimento científico. Isso pode ser visto através dos seus objetivos, métodos, influências, entre tantos outros fatores. Os tópicos concernentes aos estudos de Gil-Perez (2001), Pumfrey (1991) e alguns elencados por El-Hani (1996) são:

1. É consensual que haja uma dependência muito forte entre o conhecimento científico e a atividade experimental, os argumentos racionais e o ceticismo, mas isso não deve ser encarado como fator que deve predominar no processo de construção da ciência;
2. Toda observação depende de uma expectativa preexistente, o que exclui a ideia de que é possível coletar dados livremente, sem que estejam carregados de influências;
3. Não há um método universal de realizar a investigação científica;
4. A ciência é uma das formas pelas quais podemos interpretar os fenômenos naturais, porém não é a única;
5. A ciência é influenciada por todas as culturas e pelos contextos social, econômico, político e histórico no qual ela se desenvolve;
6. A natureza não oferece evidências simples para que seja interpretada sem ambiguidades;
7. Teorias científicas não podem ser provadas;
8. O conhecimento científico não é estático, mas mutável e aberto;
9. Os cientistas não fazem deduções incontestáveis, mas fazem julgamentos complexos;
10. Desacordos são sempre possíveis;

11. O treino coletivo é um componente essencial para os acordos científicos.

É importante deixar claro que não se pretende aqui estabelecer um método único para verificarmos os aspectos listados sobre a natureza da ciência, e sim, tomar como base a convergência das ideias presentes na literatura da área, para a elaboração do material didático que aqui se pretende.

3. CONTROVÉRSIAS CIENTÍFICAS: NOTAS INTRODUTÓRIAS

Uma das formas para a inserção da História da Ciência no ensino de Ciências é a utilização dos aspectos controversos de um dado episódio histórico. O foco nos desacordos ocorridos em determinado episódio histórico permite aos alunos a compreensão da ciência em constante desenvolvimento que tem como autores seres humanos, evitando a visão distorcida de que a ciência é estática e produto de gênios únicos ao seu tempo, contribuindo para o entendimento de sua natureza. Aspectos inerentes a elaboração de conceitos, aos estudos para o estabelecimento, mesmo que temporário, de uma teoria são melhores conhecidos durante a ocorrência de uma controvérsia, uma vez que episódios nos quais o consenso prevalece não permitem verificar, por exemplo, que os conflitos são uma consequência natural do desenvolvimento da ciência em qualquer época.

Um marco para os primeiros registros de eventos científicos que apresentaram alguma controvérsia é o momento em que a ciência e tecnologia começam a se desenvolver atreladas aos fatores sociais. Assim, o maior interesse pelos estudos científicos, o conhecimento e a compreensão do que fazem esses cientistas, inserem a sociedade diretamente no seio do desenvolvimento científico. É nesse momento que o movimento Ciência Tecnologia e Sociedade, conhecido pela sigla CTS, apresenta os seus primeiros estudos. Fatos como a explosão da bomba de Hiroshima e Nagasaki, a corrida bélica desenfreada da Rússia e dos Estados Unidos, por exemplo, por volta da década de 50, são os principais motivos que favoreceram o aumento do número de pesquisas com foco explícito nas implicações sociais das aplicações da ciência. Estes episódios ganham um caráter controverso, uma vez que dividem grupos de pessoas (sejam da comunidade científica, de movimentos sociais, dentre outros) acerca de um tema, na maioria das vezes, polêmico.

Os avanços tecnológicos nas áreas da física, química, biologia, a exemplo de temas sobre a degradação ambiental, ofereceram à ciência o lugar preferencial nas mesas de debates, fazendo-a alvo de árduas e diversificadas críticas. Um fator contribuinte para que as discussões alavancassem é a veiculação na mídia. Este canal foi/é suficientemente autônomo para atribuir a amplitude necessária aos discursos científicos, antes tidos como seguros e produtores de benfeitorias (a exemplo das pesquisas voltadas à indústria farmacêutica), e agora tendo maior visibilidade e adeptos determinados a propagar o mau uso da ciência.

Neste momento, as controvérsias relacionadas ao uso da ciência vão ganhando espaço nas pesquisas que se voltam à análise das influências do uso da ciência na sociedade e sua repercussão. Exemplos disso são: as controvérsias acerca da utilização da energia nuclear, o uso de energias renováveis, a conscientização quanto à degradação do meio ambiente, e tantas outras relacionadas ao estudo de Ciência, Tecnologia e Sociedade. Alguns estudos que realizaram essa análise são os de Ramos & Silva (2007), Reis & Galvão(2009).

No entanto, outros tipos de controvérsias estão presentes nos grandes centros Acadêmicos do mundo, desde que o conhecimento é indagado pelo homem. A estas controvérsias em que não há a intervenção da sociedade no sentido de o assunto discutido não se tratar de polêmicas sociais, damos o nome de Controvérsias Científicas de fato, e é este tipo que nos interessa neste trabalho. Nestas, a discussão prioritária não é acerca da utilização da ciência para resolução de problemas sociais, e sim a divergência entre duas ou mais teorias sobre um determinado tema que também gera divisão de grupos que possuem suas concepções particulares e também podem ser influenciadas por inúmeros fatores externos à disputa.

Na próxima seção serão apresentadas definições, características das controvérsias científicas.

3.1 O que é uma controvérsia?

Se buscarmos numa fonte acessível e imediata para consulta de definições, o dicionário, encontraremos que uma controvérsia, no Dicionário Brasileiro Globo (1993), é definida como uma “discussão acerca de assunto literário, científico ou religioso; disputa intelectual; polêmica; impugnação” (FERNANDES, 1993, p. 249).

Vejamos: algumas palavras-chave a exemplo de discussão, disputa, polêmica nos levam a associar tal conceito a inúmeras situações, inclusive cotidianas, que ocorrem corriqueiramente a nossa volta. Qualquer impasse no trabalho, na universidade pode produzir uma discussão, qualquer assunto discutido em uma aula pode gerar uma disputa entre dois ou mais grupos. E ainda, qualquer conteúdo veiculado nas redes sociais pode causar polêmica e dividir a comunidade de internautas em grandes grupos com ideias contrárias. Para a nossa pesquisa esses conceitos são fundamentais, embora estejamos tratando especificamente de controvérsias relacionadas à ciência.

Numa definição mais abrangente, Brante e Elzinga (1990) afirmam que uma controvérsia indica um choque ou disputa de opiniões contrárias, que cria a interação entre teorias divergentes pertencentes a grupos antagonistas. A palavra contradição, embora indique contestação e oposição, não representa um bom sinônimo já que também indica, equívocos ou incoerências, o que se opõe ao significado mais coerente para controvérsias (BRANTE & ELZINGA, 1990, p. 36).

Tratando-se de controvérsias científicas, é importante definirmos e diferenciarmos as controvérsias relacionadas ao uso da ciência e as controvérsias científicas de fato. Para isso, apontamos uma consideração de Ramos & Silva (2007), no caso das controvérsias técnico-científicas, na qual eles afirmam que as controvérsias relacionadas ao uso da ciência são denominadas científicas porque se faz necessário que sejam relegadas às mãos de especialistas. Uma vez que a ciência está completamente imersa na sociedade, a comunidade científica também estará envolvida nos debates relacionados ao que acontece na esfera social. Isto implica dizer que as controvérsias da mesma natureza daquelas que discutem a destinação do lixo produzido por hospitais, pelas usinas nucleares, a realocações de lixões urbanos, podem ser entendidas como controvérsias sociais ou políticas.

A definição apresentada por Baltas (2000), no livro *Scientific Controversies: Philosophical and Historical Perspectives* afirma que uma controvérsia científica vai além de um mero desacordo. É algo que não pode ser resolvido prontamente recorrendo aos “cânones disciplinares comumente aceitos para conduzir uma pesquisa relevante (...) A divergência pode ser suficientemente profunda e implicar na avaliação destes cânones”. (BALTAS, 2000, p. 44)

A definição de Narasimhan (2001, p. 299) nos diz que as controvérsias são parte integrante da produção coletiva do conhecimento; os desacordos conceituais, métodos, interpretações e aplicações são a força vital da ciência e os fatores mais produtivos no desenvolvimento científico. Ele ainda define controvérsia como: “(...) uma disputa publicamente conduzida e persistentemente mantida por uma questão de crença considerada significativa por um número de cientistas praticantes”.

Analisando a definição de Narasimhan, percebemos, primeiramente, que uma controvérsia é um evento público que deve ser conduzido por dois ou mais participantes, pela comunidade científica ou por grupos de pessoas que assumam posturas opostas e que tornem o evento reconhecido publicamente. A simples divergência de opiniões ou as várias

possibilidade de elaboração de teorias ou de suas críticas, sem que haja um reconhecimento da comunidade científica, por exemplo, não confere ao desacordo o *status* de controvérsia.

Em segundo lugar, a crença mantida como mencionado na citação, expressa a vontade que os participantes do evento têm de apresentar suas opiniões que, na maioria das vezes, são carregadas dos seus juízos de valor, e sofrem influências diretas das personalidades de cada pesquisador, mesmo antes de serem afetadas pelas influências externas.

Por último, afirmar que a controvérsia é mantida persistentemente é dizer que a mesma deve ocorrer num determinado período de tempo, ou seja, ganha o caráter de evento histórico, no qual a participação da população, quando acontece, lhe confere dimensão social.

Velho e Velho (2002, p. 127) ainda acrescentam que uma controvérsia científica preocupa-se com uma questão de crença sobre a qual as partes interessadas elaboram seus argumentos contrariando as opiniões umas das outras. Assim como Narasimhan, eles acreditam que o desacordo deve ocorrer em “uma troca pública - oral ou escrita - de argumentos e contra-argumentos, para que qualquer um que nela se envolva ou por ela se interesse possa julgar os méritos do caso”. Além disso, eles afirmam que elas podem ser consideradas um fenômeno social, que não seja reduzida nem a uma categoria restrita, a lógica, puramente psicológica ou cognitiva, ou seja, devem ser consideradas na sua totalidade como produto de aspectos epistêmicos e não epistêmicos (VELHO & VELHO, 2002, p. 127).

Vale adicionar à definição citada outra concepção de Brante & Elzinga (1990, p. 33) que afirmam: “Controvérsias científicas são um local estratégico e frutífero para os estudos da ciência que possuem uma dupla contingência epistemológica e política”.

Diante disso, conceituamos controvérsias científicas como um evento situado historicamente no tempo que deve possuir pelo menos dois posicionamentos diferentes, independente de serem adotados por personagens isolados, ou por grupos de adeptos. Este debate deve apresentar considerações, fundamentos, às vezes teorias, conceitos, etc., que exponham, muitas vezes aspectos divergentes sobre um mesmo fenômeno buscando interpretá-lo de modo a complementar os conceitos científicos anteriores, o que pode acontecer a partir de uma reconstrução de uma teoria precedente e a reavaliação de fatos anteriores.

Esse debate deve ser conduzido perante o público externo, uma vez que sendo posto para a apreciação de membros externos, a controvérsia vai adquirindo mais e mais adeptos que podem se aliar aos grupos que defendem ideias coerentes com a sua linha de pensamento. Dessa maneira, a controvérsia começa a atingir dimensões consideráveis, além de assumir o caráter de evento situado na história, conforme mencionamos anteriormente.

É por esse motivo, por se tratar de um momento de discordância, que as controvérsias se mostram um lugar favorável ao estudo da ciência, permitindo ao aluno compreender que os desacordos sempre se apresentam na elaboração do conhecimento científico. A riqueza de aspectos como a sua duração, o período da história em que ela aconteceu, os personagens envolvidos, as teorias aceitas no momento da disputa, oferecem ao ensino de Ciências uma visão cada vez menos distorcida de como se dão os estudos e a validação de teorias, que na maioria das vezes são apresentados de uma maneira tão perfeita em referenciais utilizados, por exemplo, nos cursos de graduação.

3.2 Fatores que influenciam as controvérsias

Uma controvérsia, enquanto algo que relaciona comunidades científicas, suas correntes de pensamento, a pluralidade de ideias, pode ser influenciada tanto pelo meio externo e pelo comportamento dos envolvidos, quanto por fatores inerentes ao desenvolvimento de teorias, conceitos, aqueles de cunho científicos. Estes últimos são aqueles internos. Diante disso, podemos classificar estes fatores que influenciam as controvérsias como fatores internos e externos, ou ainda como fatores epistêmicos e não epistêmicos. Fatores internos, ou epistêmicos, correspondem aos fatores verificados no desenvolvimento de determinada teoria, os aspectos vinculados às observações, nas considerações feitas a partir da prática experimental, na adoção ou rejeição de hipóteses, os princípios tomados como base para escolha de métodos na realização da atividade científica, enfim, tudo o que se relacionar com a estrutura do conhecimento (NARASIMHAN, 2001, p. 299).

Para justificar o seu conceito de controvérsias científicas e, posteriormente nos apresentar uma classificação sugerida para o seu estudo, Baltas (2000) diferentemente de Narasimhan (2001) se utiliza de um termo denominado *background 'assumptions'*, traduzidas aqui como sendo 'hipóteses' de background, entendidas como aquelas

suposições presentes no plano de fundo da elaboração de qualquer teoria, que permeiam a aceitação, rejeição e todos os debates necessários para o estabelecimento da mesma. Segundo Baltas (2000, p. 41), estas são as ‘hipóteses’ que qualquer processo de investigação não poderia deixar de levar junto com ele.

Para que a ciência funcione efetivamente, o conjunto de processos particulares e inerentes à investigação deve ser realizado levando em consideração que um conjunto de premissas postuladas publicamente, pode ser testável e reformulados, uma vez que as premissas se apresentam, inicialmente, abertas a questionamentos e estão sujeitas à confirmação, ao ajustamento ou à refutação. O segundo item destacado pelo autor é que as ‘hipóteses’ de *background* vão do profundo ao superficial, e do cegamente ‘aceito’ até o consensualmente adotado.

Para isso, ele estabeleceu suas ‘hipóteses’ dividindo-as em quatro:

- I. ‘Hipóteses’ Constitutivas: que são consideradas os componentes responsáveis pelo estabelecimento de um sistema conceitual científico, pois asseguram sua coerência e determinam sua identidade. Em se tratando da física, as hipóteses envolvidas no conceito de tempo e espaço, no estudo do movimento relativo, ou posição e momento podem ser consideradas como constitutivas do sistema conceitual de Newton.
- II. ‘Hipóteses’ Interpretativas: Estas são as que determinam de que maneira o sistema conceitual é naturalmente interpretado, depois que ele é estabelecido. Sua divulgação não transforma radicalmente o sistema conceitual, ela somente mostra a capacidade de descrever cognitivamente o fenômeno.

As características destas duas primeiras hipóteses podem ser relacionadas ao que Narasimhan (2001) chamou de fatores internos, inerentes a elaboração dos conceitos quando levamos em considerações os elementos científicos do conceito e a maneira como o interpretamos.

Os fatores internos ou epistêmicos fornecem ao estudo das controvérsias o conhecimento acerca das bases do conhecimento científico, a essência da construção de determinadas teorias. Dessa maneira, algumas das visões deformadas da ciência podem ser desconstruídas, a exemplo da concepção que muitos professores, e até pesquisadores da ciência, possuem de esquecer ou não dar importância ao processo de aceitação de uma teoria, às contribuições de vários estudiosos, a divergência de opinião, etc.

Em seguida, as duas últimas hipóteses listadas por Baltas (2000) referem-se às singularidades de grupos, digamos, ao estilo de cada pesquisador em seus programas de pesquisas e suas correntes de pensamento. Neste caso, se misturam fatores internos e externos à elaboração das teorias, uma vez que a escolha pessoal, a identificação de cada componente pode influenciar os debates, caracterizando as partes envolvidas e sendo responsáveis pelo andamento da disputa. As ‘hipóteses’ são:

- I. ‘Hipóteses’ de participação: Estas determinam as tradições científicas particulares, nacional ou de outra maneira, e/ou particulares os “estilos de raciocínio” que os cientistas tendem a seguir. Por exemplo, cientistas envolvidos na tradição “empírica” podem ser impedidos, pela hipótese de participação, de reconhecer a significância de alguns resultados teóricos devido ao seu estilo de raciocínio particular. Reciprocamente, uma tradição “racionalista” ou estilo de raciocínio focado na teoria axiomática, adota uma hipótese de participação que pode evitar os cientistas que compactuam deste estilo de se envolverem com algum resultado experimental relevante para o seu trabalho teórico.
- II. ‘Hipóteses’ de Preferência: Esta é hipótese de ‘background’ envolvida nos critérios estabelecidos pelos cientistas para a escolha de um programa de pesquisa necessário para a realização de um trabalho.

Contrariamente aos internos, os fatores externos, extracientíficos ou ainda não-epistêmicos, são identificados nas relações sociais, na personalidade dos personagens, nas alianças estabelecidas entre eles, as suas concepções metafísicas, influências religiosas, entre outros.

É necessário olhar para as controvérsias assumindo essa dupla contingência, ou seja, percebendo como os objetos de investigação se tornam objetos de pesquisa, considerando que as suas teorias científicas possuem tanto um mundo epistêmico (aspectos internos) quanto um contexto sócio-histórico, em que elas são postuladas e implementadas, que também se reflete pelas características de grupos de pesquisas e suas identidades na elaboração da ciência. Todos esses aspectos podem ser considerados fatores externos ao desenvolvimento científico de conceitos e teorias.

Nessa perspectiva, entendendo o contexto sócio-histórico como primordial para o desenvolvimento da ciência, devemos também, e com igual atenção, considerar os fatores não-epistêmicos e a sua relevância no desenvolvimento, no desfecho, aceitação ou rejeição

de teorias em uma controvérsia. Dessa maneira, vale nos posicionarmos contrariamente a Narasimhan (2001, p. 300), quando afirma que os fatores não-epistêmicos não constituem os verdadeiros argumentos e não devem ser levados em consideração como relevantes ao mérito do caso, isto é, não são responsáveis pelo desfecho de uma controvérsia. Muitas controvérsias analisadas apresentam a relevância destes fatores para a consolidação de teorias em momentos controversos. A controvérsia em torno do Princípio de Ação Mínima é um desses exemplos.

Outra caracterização pertinente ao estudo das controvérsias científicas, é a classificação quanto à sua natureza, aos aspectos que a originaram, se elas dizem respeito a teorias ou concepções mais abrangentes, etc. A taxonomia proposta por Narasimhan (2001, p. 300) divide as controvérsias em: controvérsias de fato, controvérsias de teoria, controvérsias de princípio e controvérsias mistas.

As controvérsias de teoria são as mais comuns e se caracterizam simplesmente pela divergência entre duas teorias que pretendem explicar um mesmo fenômeno. Um exemplo comum são as várias interpretações sobre a propagação da luz do Sol em direção a Terra. Uma vez que a natureza não oferece evidências para que os fenômenos naturais não sejam interpretados sem ambiguidades, controvérsias desse tipo sempre existirão.

Neste caso, existem sempre teorias rivais incompatíveis ou não, e todo esforço é feito para que se chegue a um consenso, verificando qual delas possui um registro para a explicação de determinado fato ou fenômeno observado, significativamente melhor do que as outras. É importante destacar que não existe uma metodologia automática para a escolha das melhores teorias componentes das controvérsias. Os critérios para a escolha não são claros e algorítmicos, isto é, o processo de conclusão de uma teoria é subjetivo, por isso, não deixa clara, nem elege a vigência de uma teoria em detrimento de outras, a não ser que as teorias, digamos, “perdedoras”, apresentem incoerências notórias ou não expliquem satisfatoriamente o que se pretende.

Até hoje, por exemplo, existe um debate acerca da existência do éter contra a existência do vácuo. Embora a maioria dos físicos negue o éter, esta é uma escolha convencional que não elimina a existência de uma parcela de estudiosos que fundamentam muito bem a existência do éter. Isto exemplifica a subjetividade na resolução de uma controvérsia e a possibilidade de o desacordo permanecer mesmo depois de um suposto encerramento do episódio controverso. Assim é possível observar que não há métodos infalíveis e fechados que decidam por uma em vez de outra.

Outro fator que reforça essa subjetividade são justamente os personagens que julgam as teorias rivais. Eles são os membros da comunidade científica, e estão completamente carregados de princípios, de valores e, muitas vezes, representam as correntes que julgam serem mais coerentes ou não. Os próprios personagens envolvidos nas controvérsias são também os “juizes” e parte da comunidade que decidem o final do embate. Desse modo, é possível que um membro da comunidade acadêmica, embora considerando que uma teoria A atenda melhor aos critérios estabelecidos para a sua validade, poderá não ser de acordo com o que os seus representantes defendem, simplesmente pelo fato de pertencer e compactuar com um grupo de ideologias, correntes de pensamentos que defendem uma teoria B.

Se as controvérsias podem ser consideradas como eventos históricos, como foi mencionado anteriormente, elas estão localizadas no tempo. Dessa maneira, possuem início, estágio intermediário e um desfecho. Elas possuem um determinado *background* que deve ser considerado principalmente porque representa alguma influência no desencadeamento das mesmas, bem como possuem um período de conflitos, divergências, de mudanças de pensamento, e, por fim, são concluídas.

Ainda a respeito dessa dicotomia, as controvérsias também podem ser denominadas internalistas e externalistas. As internalistas enfatizam apenas os aspectos cognitivos, apresentando como ponto focal apenas os argumentos científicos, referindo-se apenas às diferenças de opinião dentro da comunidade científica, sem implicações que além desse âmbito, que ultrapassam e atingem o extracientífico, que está ‘por fora’. Exemplos destas são as controvérsias de teoria, de fato e de princípio apresentadas anteriormente.

Contudo, é quase impossível pensar numa controvérsia puramente internalista, isto porque os próprios personagens que defendem as teorias componentes da controvérsia estão inseridos em um contexto social e acadêmico, eles possuem suas prioridades, seus ideais, influências econômicas, níveis de hierarquias, etc. Torna-se, inclusive, inviável falar de ciência sem que se observe qual o panorama, a situação na qual se inserem os estudos, contribuições e, conseqüentemente, em que estão localizados os responsáveis por isso. Por exemplo, tratar a elaboração e o frutífero momento das pesquisas para o armamento bélico sem considerar o momento no qual elas despontaram, torna-se incoerente e incompleto, uma vez que a situação histórica e social pode, certamente, justificar os investimentos e a ânsia por resultados positivos.

Para além das controvérsias internalistas e externalistas, a literatura nos aponta classificações tais como: controvérsias de fatos e de valores; controvérsias científicas e filosóficas ou controvérsias científicas e trans-científicas. As primeiras de cada grupo possuem a mesma característica das que consideram principalmente os aspectos epistêmicos e as segundas são semelhantes às que priorizam fatores externos ou não epistêmicos.

3.3 Classificação de controvérsias – a relação entre o seu desenvolvimento e as questões que as originaram

O que determina o tipo de controvérsia que estudamos é exatamente a questão que a originou, qual o tipo de conflito ou o problema emergente que contribuiu para que se iniciasse um desacordo relacionado a qualquer fenômeno. Outra taxonomia encontrada na literatura diz respeito aos aspectos que as originaram. Neste caso, as controvérsias se dividem em: controvérsias de fato, de teoria e de princípios. (BRANTE & ELZINGA, 1990, p. 37; NARASIMHAN, 2001, p. 300). Considerando os estudos de Machamer et al (2000), ainda podemos entender as controvérsias baseadas nas ‘hipóteses’ de background apresentadas há pouco. Neste caso, temos três tipos: as denominadas de controvérsias superficiais, uma segunda caracterização intermediária, digamos assim, e o terceiro denominado de controvérsias profundas⁴.

Iniciando com as definições de Narasimhan (2001), temos:

As **controvérsias de fato** estão diretamente relacionadas ao objeto empírico, ou seja, ao que é realmente observado e constatado a partir da observação. Essas controvérsias se originam quando há um desacordo relacionado a um fato observado, que geralmente é a divergência de opiniões quanto à explicação deste fato. É importante lembrar que as controvérsias de fato consideram a observação como a base da ciência.

Um exemplo clássico são as verificações experimentais de Dayton Miller (1866-1941) para a validação da hipótese de que a Terra se movia através do éter, contrariando os experimentos realizados no final do século XIX e início do século XX que não detectavam

⁴ As denominações sugeridas por Baltas (2000) são referentes à dimensão do possível desacordo em cada um dos tipos. Quando as partes envolvidas em uma controvérsia divergem em ‘hipóteses’ de participação e preferência, elas são superficiais, pois conseguem se resolver mais facilmente. Naquelas em que os desacordos são no âmbito da interpretação, assumem um nível maior e, se não concordam em nenhuma das ‘hipóteses’ são consideradas profundas por permitirem enxergar melhor uma maior quantidade de fatores característicos das controvérsias.

tão claramente a existência de um meio através do qual a terra se moveria, ele publicou na década de 1920 o resultado de novas pesquisas realizadas no alto do Monte Wilson que pareciam indicar um vento de éter de aproximadamente 9 km/s (MARTINS,1986, p. 112).

As **controvérsias teóricas** são as mais comuns e também incluem as controvérsias de fato, uma vez que qualquer observação pressupõe uma teoria, ou, pelo menos, concepções anteriores que orientam a atividade experimental. Neste tipo, as controvérsias acontecem quando temos duas teorias pretendendo explicar um mesmo fenômeno. Um exemplo clássico de uma controvérsia de teorias é a controvérsia acerca da natureza do calor.

Entre os séculos XVII e XVIII, uma das correntes existentes na época adotava a teoria do flogístico que afirmava, basicamente, que quando um objeto queimava, ele liberava um elemento que possuía massa e estava presente em todos os materiais combustíveis (o flogístico), assim o objeto tornar-se-ia elementar. As substâncias que queimavam bem possuíam maior quantidade de flogístico, e aquelas que não queimavam não possuíam o elemento.

Outro grupo de estudiosos defendia a ideia de calor como um fluido que passa de um corpo para o outro, assim como a água escoando de um nível para outro. Por analogia, teríamos que a água no seu nível mais alto estaria para o calor em um corpo com temperatura elevada e vice-versa. Então, a partir desta concepção de calor, este foi denominado calórico no final do século XVIII por Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), isto é, “substância calor” que era destituída de peso e se conservava em todo o universo. (BROWN, 2007, p. 2372)

Porém, a observação de fatos onde se verifica a criação de calor, como a produção da ignição ou queima da madeira através do aquecimento por atrito, mostrava a dificuldade da explicação de fenômenos como este por parte da teoria do calor como substância. A experiência realizada pelo Conde Rumford a partir da produção de calor pelo atrito mostrou que a teoria do calórico não era suficiente para explicar o calor produzido nos canhões. O mesmo não poderia estar contido antes no metal e não poderia ser uma substância que estivesse saindo sempre de suas peças (RUMFORD, 1870).

Neste caso, observa-se que três concepções dividiram correntes de pensamento, embora não tenham sido elaboradas em uma mesma época. A controvérsia se estendeu até que os grupos compreendessem a melhor organização e a explicação de apenas uma das

teorias em detrimento das outras, o que não necessariamente implica em todas as correntes acreditarem na teoria mais coerente aos olhos da comunidade.

As **controvérsias de princípios** são mais gerais, uma vez que envolvem visões acerca do mundo em que vivemos e abrangem concepções que dizem respeito às bases da ciência. Um exemplo é a controvérsia existente acerca da posição da Terra em relação ao Sol, as teorias geocêntrica e heliocêntrica, e princípios criacionista e evolucionista para a explicação da origem da vida. Este tipo de controvérsia não está isento de considerações extracientíficas, uma vez que envolve um tipo de crença da sociedade. Nesse sentido, os aspectos sociais e religiosos também influenciam na tomada de decisão até mesmo da comunidade científica.

Por fim, ainda é possível caracterizar aquelas controvérsias em que há a interação entre os aspectos científicos, morais, etc. Neste caso, a controvérsia envolve não somente a teoria científica, seu desenvolvimento e o processo árduo da produção do conhecimento científico, mas também a aplicação deste conhecimento. Nestas, as visões de mundo e os valores dos grupos representantes destas visões são ambos considerados. Exemplos disso são: as decisões acerca da utilização das células-tronco, a utilização de tecnologias na cura de doenças, na produção de energia, todas as controvérsias quanto ao uso da ciência.

Estas controvérsias são denominadas **controvérsias “mistas”** e nelas é impossível se desvincular os aspectos puramente científicos da dimensão social, ou seja, livrar-se da dicotomia dos fatores epistêmicos e não epistêmicos, já que a sociedade também deve ser parte representante na tomada de decisões provenientes do campo científico da sua nação. Neste sentido, as controvérsias podem ser geradas socialmente, mostrando que elas não são puras e serem relatadas por contradições pessoais ou sociais, diferentes interesses econômicos, etc.

Voltando à categorização apresentada por Baltas (2000), com base nas suas ‘hipóteses’ de background, ele descreve três tipos de controvérsias: a primeira é aquela em que as partes envolvidas compartilham as hipóteses constitutiva e interpretativa envolvidas na pesquisa, mas não compartilham as hipóteses de participação e/ou de preferência. Ou seja, os desacordos presentes não dizem respeito a uma discordância quanto aos componentes de um determinado conceito, mas sim no que se refere aos diferentes tipos de raciocínio que levam a elaborar tal conceito, às preferências, aos interesses pessoais tanto no âmbito acadêmico quanto social. Segundo Baltas (2000, p. 46), “As partes pouco entendem o que a outra está fazendo ou porque está sendo feito; as “hipóteses” que lhes

interessam os levam apenas a considerar sua própria linha de investigação como sendo mais promissora”.

São controvérsias consideradas superficiais por não lidarem com aspectos mais profundos da dimensão cognitiva e, por esse motivo, as questões científicas são resolvidas com certa rapidez, depois que um novo resultado científico é estabelecido. Isso não pode ser dito quanto aos aspectos relacionados à dimensão social. Compartilhar de elementos constitutivos e interpretativos não implica em um acordo quanto aos aspectos sociais, políticos e as preferências culturais, digamos, envolvidos em uma disputa.

O segundo tipo de controvérsia compreende aquela na qual as partes envolvidas compartilham as ‘hipóteses’ constitutivas envolvidas na pesquisa, mas não todas as ‘hipóteses’ interpretativas relevantes. Por esse motivo, algumas situações em que as teorias são incomensuráveis podem se encaixar nesse caso. Os debates entre Bohr e Einstein sobre a interpretação do formalismo da mecânica quântica é um bom exemplo deste tipo. Um fenômeno incomensurável ou questões de comunicação da teoria se tornam sérios na medida em que o sistema conceitual por si mesmo não se desenvolve com tanta amplitude, o que implica em dizer que os conceitos envolvidos na controvérsia ainda não estão tão claros para os disputantes.

No terceiro tipo de controvérsias, aquelas profundas, as partes envolvidas não compartilham nenhuma das hipóteses de background envolvidas na pesquisa, ou seja, o desacordo é total. Por isso, se mostra mais rica para a compreensão de um número maior de fatores envolvidos nestes debates. Nela podemos ainda, definir duas subcategorias: as que envolvem alguma das “hipóteses” de background que asseguram a coerência e o determinismo da identidade de um sistema conceitual bem constituído, de uma ciência já existente e estabelecida, mostrando que a causa da controvérsia não é da ordem constitutiva. A disputa entre Lorentz e Einstein ou entre os proponentes da física quântica e aqueles da mecânica clássica exemplificam este ponto.

A segunda subcategoria compreende aquelas que ocorrem quando a própria perspectiva de definição de uma ciência está em processo de elaboração. As “hipóteses” em debate não são aquelas constitutivas do novo sistema de conceitos que está em um processo de criação, são aquelas que determinam a identidade e a coerência de teorias antigas particulares que o novo sistema de conceito mudou constitutivamente. A disputa entre Galileo e os Aristotélicos, a controvérsia entre Volta e Galvani, exemplificam melhor esta categoria que, do ponto de vista cognitivo, é o mais importante tipo de controvérsia.

Em ambas subcategorias, a nova teoria aparece sempre incompreensível para aqueles que ainda passeiam pelas velhas teorias, embora o contrário não seja verdade, isto é, para aqueles que passeiam pelas novas ideias, ainda assim é possível compreender as velhas teorias.

3.4 A conclusão de uma controvérsia

Várias são as possibilidades para que uma controvérsia tenha o seu desfecho, ou seja concluída. As teorias envolvidas tanto podem ganhar uma adesão considerável, sendo adotada como válidas para a maioria de uma comunidade, como também esta mesma teoria pode não possuir tantos adeptos por não oferecer argumentos sólidos, claros e convincentes.

No entanto, é importante citar o conceito de incomensurabilidade de Kuhn (1962, p. 23), que esclarece quanto à existência de teorias que não oferecem a possibilidade de comparação entre elas. Nestes casos, os grupos envolvidos nas controvérsias buscam encontrar uma teoria que melhor explique um fenômeno, porém algumas delas não são compatíveis, não por insucesso do método como foram elaboradas, mas pela incomensurabilidade de suas maneiras de ver e entender o mundo. Chalmers (1993, p. 178), quando compara os conceitos de incomensurabilidade de Kuhn e Feyerabend, afirma que este conceito se aplica quando os princípios fundamentais de duas teorias rivais são radicalmente diferentes e, nestes casos, não é possível formular os conceitos básicos de uma teoria nos termos da outra, nem compará-las logicamente porque elas não compartilham as mesmas proposições de observação.

Um exemplo de incomensurabilidade citado por Chalmers (1993) é a relação entre a Mecânica Clássica e a Teoria de Relatividade. Se interpretarmos cada uma delas, observando as suas formas de ver o mundo, percebemos que na Mecânica Clássica os objetos físicos possuem forma, massa e volume, sendo possível identificar suas mudanças através da interferência física. Em contrapartida, na Teoria de Relatividade, estas propriedades não existem, mas podem ser relacionadas e sofrerem mudanças, sem interação física nenhuma, mudando-se de um quadro de referência para outro. “As duas teorias são incomensuráveis e não podem ser comparadas através de suas conseqüências lógicas”. (CHALMERS, 1993, p. 178-179).

Esta incomensurabilidade pode acontecer de três maneiras: devido à diferença de significados dos termos em paradigmas diferentes, devido à mudança de dados coletados experimentalmente e devido à mudança do olhar do cientista ao fenômeno estudado. Por exemplo, uma nova teoria, ou um novo paradigma, pode utilizar velhos termos, conceitos e experimentos de paradigmas anteriores, sendo que sob novas relações de uns com os outros, mudando o significado dos termos, como é o caso do movimento da Terra para os Copernicanos e para os estudiosos anteriores a ele⁵.

Portanto, nem sempre podemos afirmar que uma teoria se sobressai perante outra. Algumas teorias são contrárias a outras, divergindo em algumas considerações, e concordando em outras. Dessa maneira, em algumas controvérsias científicas, a sua conclusão acontece quando uma teoria é seguida pela maioria da comunidade científica, apenas por apresentar um conjunto específico de aspectos semelhantes que facilita a compreensão dos fatos pretendidos em um determinado momento.

Quanto à classificação da forma de conclusão de uma controvérsia, de acordo com Brante&Elzinga (1990, p. 41) e Narasimhan (2001, p. 300), elas podem ser: abandonadas, encerradas ou resolvidas. As **abandonadas** são aquelas que não se encerram de maneira satisfatória. Esse desfecho pode se dar pelo abandono ao tema discutido, à teoria defendida ou pelo abandono de alguma das partes da controvérsia. Às vezes devido à morte de um dos personagens, devido ao desgaste das partes, à insistência mútua e a não aceitação de pontos negativos nas suas teorias. Os personagens simplesmente deixam a discussão devido a fatores alheios aos envolvidos na briga e a controvérsia é tida como abandonada.

No caso das **encerradas**, de alguma forma, os fatores não epistêmicos encerram o debate. Há a intervenção de alguma autoridade, podendo ser o Estado, a opinião dos governos, seguindo a opinião de referendos populares, o parlamento ou equivalente que tentam resolver a discussão a partir de um voto coerente com as teorias em desacordo (no caso da aceitação do aborto e das pesquisas utilizando células-tronco), etc. Este tipo de conclusão é mais comum quando tratamos de controvérsias quanto ao uso da ciência e suas implicações diretas na sociedade. No caso das controvérsias de teorias científicas, as denominadas controvérsias científicas de fato, as autoridades podem interferir de uma maneira bastante razoável, porém não houve casos em que se pode atribuir unicamente a elas o desfecho do debate.

⁵ Ver a discussão apresentada por Kuhn (1962) sobre a incomensurabilidade destes significados.

Outra maneira pela qual uma controvérsia termina é quando a mesma é **resolvida**. Diz-se que uma controvérsia é resolvida quando é possível chegar a um acordo. Uma das partes é capaz de convencer seus opositores, e as divergências dão lugar à aceitação de uma das teorias envolvidas, ou de um conjunto comum de critérios acordados por ambas as partes.

Nem sempre as controvérsias são resolvidas, tendo como vencedora apenas uma teoria. Na maioria das vezes, as teorias são adotadas pela maioria da comunidade científica simplesmente porque possui um número de elementos suficientes para torná-la capaz de explicar determinado fenômeno. Mesmo sendo a “melhor” teoria ela também pode apresentar lacunas que podem ser superadas pela sua rival, tornando esta última também uma teoria aceita. Neste caso também vale citar o conceito de incomensurabilidade de Kuhn (1962) já discutido anteriormente.

Um exemplo de controvérsia na qual as duas teorias continuam vigorando é o caso da dualidade onda-partícula. A luz pode ser interpretada a partir da teoria em que ela se comporta e assume comportamentos ondulatórios, bem como por ser compreendida como partícula.

Sejam resolvidas ou não, é importante frisar que controvérsias científicas são episódios em que quanto mais o desacordo prevalece, mais elementos nos é oferecido e servem para o aprofundamento das questões propostas pelas suas partes. Para Brante e Elzinga (1990, p. 37), as controvérsias são manifestações de profundas contradições teóricas, relacionadas a algum fato ou a determinados princípios. Além disso, elas possuem suas causas em um nível estrutural, por isso devem ser compreendidas como um ponto de ruptura, ou seja, se uma teoria ou um fato, por exemplo, exige uma mudança no conjunto de conceitos que formam a sua estrutura, temos uma ruptura, pois os conceitos antes utilizados para explicar determinado fenômeno agora passam por tentativas de negação produzidas pela existência de outras teorias.

3.5 As controvérsias e suas possíveis abordagens

Outra categorização feita por Brante e Elzinga (1990) é quanto ao tipo de abordagem que pode ser feita ao estudar as controvérsias. Eles elencam três, são elas: a abordagem epistemológica, descritiva e política.

Abordagem epistemológica-síncrona: são simultâneas, síncronas e tem como objetivo as implicações destes desacordos em conceitos como objetividade científica, racionalidade, verdade e neutralidade. O ponto chave deste tipo de abordagem é a validade do conhecimento e se a existência das controvérsias implicam em “ferir” uma racionalidade universal, se elas permitem que se alcancem conclusões céticas e relativistas no que dizem respeito à construção do conhecimento.

Estudar controvérsias a partir de um ponto de vista epistemológico é abstrair e comparar sistematicamente os argumentos básicos das partes que disputam. Desta forma, a estrutura argumentativa de uma controvérsia pode ser divulgada, delineada e analisada. Mas a controvérsia não é apenas uma estrutura argumentativa, é também um processo com uma história específica (BRANTE & ELZINGA, 1990. p. 40).

Abordagem descritiva-diacrônica: este tipo de abordagem, como o nome sugere, é a abordagem na qual a controvérsia tem o seu curso de desenvolvimento detalhado, ou seja, a sua emergência, seu desenvolvimento e o seu fim. Dessa forma, esta abordagem é caracterizada principalmente como sendo histórica. A abordagem diacrônica busca compreender os conceitos, as teorias e os métodos utilizados para sua construção, à luz do ponto de vista aceito na época em que eles foram desenvolvidos.

Para este tipo são sugeridos vários meios de exploração e modelos de periodização das controvérsias científicas, distinguindo, por exemplo, três etapas gerais: surgimento, como sendo o ponto de partida para as divergências entre duas ou mais teorias, ou ainda o problema inicial que desencadeia a divisão da comunidade acadêmica em grupos para tentarem resolver este problema à luz da sua teoria; o desenvolvimento, sendo todo o caminho que percorre a disputa, valendo mencionar as alianças, os rompimentos, as mudanças de opinião, as descobertas, etc., e, por fim, o desfecho (as considerações para esta etapa já foram discutidas anteriormente quando se tratou das maneiras como as controvérsias são concluídas).

Abordagem político-contextual: Nesta abordagem, pretende-se estudar a controvérsia localizando-a no seu contexto social, delineando os interesses sociais, políticos e econômicos determinantes. Neste sentido, verifica-se, quando necessário, quais as partes envolvidas na disputa que estão diretamente relacionadas aos grupos de interesses e as que dependem deles, na tentativa de justificar o processo de desenvolvimento e o desfecho de uma dada controvérsia.

A maioria das controvérsias, principalmente aquelas voltadas ao uso da ciência e suas implicações sociais, pode ser representadas politicamente, pois compreende disputas sociais nas quais estão presentes a negociação, a sustentação de valores em um momento de mudança científica, assim como a necessidade de investimentos governamentais para o desenvolvimento das pesquisas. Estes fatores se configuram em aspectos relevantes e suficientes para abordar uma dada controvérsia sob esta perspectiva.

O termo político nessa abordagem refere-se às influências dos poderes políticos na tomada de decisões quando se trata de aplicações científicas com implicações diretas na sociedade. O que é completamente diferente das disputas existentes dentro da academia devido aos interesses de grupos, mas que também se faz presente no seio do desenvolvimento científico dentro das academias e grandes centros de pesquisas.

Abordagem integrativa: Nesta abordagem as perspectivas apresentadas anteriormente são combinadas, uma vez que elas não devem ser vistas como mutuamente exclusivas. Trata-se de estudar as controvérsias utilizando considerações tanto diacrônicas quanto síncronas, observando todas as fases da controvérsia e analisando-as sob as perspectivas epistemológica e política, assumindo que elas estão fortemente relacionadas.

3.6 Por que estudar controvérsias?

Muitas teorias racionalistas da ciência são direcionadas à ciência como autônoma, por isso, nessa perspectiva, os conflitos, os fenômenos anormais e desviantes devem ser superados de alguma maneira. A ideia configura-se em controlar as controvérsias, atingir o quanto antes um resultado consensual. Isto implica em dizer que há uma busca incessante pelos critérios comuns, válidos universalmente que nos permita distinguir a ciência entre todas as outras formas do conhecimento. Em outras palavras, a negligência das controvérsias representa a ambição de encontrar semelhanças e eliminar os desacordos. (BRANTE & ELZINGA, 1990, p. 33)

Contrariamente a este tipo de pensamento, este trabalho pretende abordar os aspectos de uma controvérsia científica acreditando, dentre tantas justificativas:

- Ser mais fácil identificar influências sociais sobre conteúdos que passam por situações de disputas, do que os que passam apenas por situações em que o consenso prevalece;
- Perceber de que maneira o *status* do conhecimento científico depende de negociações e de debates entre as partes interessadas durante uma controvérsia, envolvendo não

somente a comunidade científica, assim como os mais variados segmentos da sociedade;

- Na possibilidade de desconstruir ideias como a de neutralidade, objetividade, ciência estável, que os alunos possuem quanto ao conhecimento científico, mesmo quando se utiliza de controvérsias a partir de uma abordagem puramente internalista;
- Contribuir para a compreensão do processo de desenvolvimento do conhecimento científico a partir da análise dos argumentos elaborados pelos personagens durante o conflito;
- Compreender os processos de negociação dentro da comunidade científica para a aceitação ou rejeição das teorias tidas como objetos da controvérsia.

Dessa maneira, os aspectos não epistêmicos são valorizados e apresentados em conjunto com os aspectos epistêmicos. Uma controvérsia na qual estão aliados os pontos de vista epistêmico e não epistêmico, não implica em trazer as teorias que constituem o objeto da pesquisa como meras simplificações, pelo contrário, nesta perspectiva, o estudo possibilita uma compreensão mais ampla do episódio histórico, uma vez que se discutem aspectos inerentes à dimensão interna da disputa e os fatores externos onde a mesma está situada, além de possibilitar uma compreensão mais aprofundada do conhecimento científico envolvido no episódio.

Um dos papéis principais da utilização das controvérsias científicas nas salas de aula de ciências numa perspectiva social é apresentar a ciência inserida no meio social, constituindo-se em um dos seus elementos, ao invés de desconectá-la e apresentá-la como uma atividade paralela que não se comunica com o contexto social. É assim que o conhecimento deixa de ser visto com as visões distorcidas elencadas por Gil-Perez et al (2001). Assim, o conhecimento se desenvolve numa perspectiva histórica, influenciado pelas dimensões social, econômica, cultural, etc.

Neste sentido as atividades científicas são abordadas enquanto um processo no qual o conhecimento está em constante desenvolvimento, no qual o raciocínio científico se relaciona com a sociedade e a ciência evolui historicamente. Assim se desconstrói a ideia, já enraizada nas salas de aulas, inclusive compartilhadas pelos professores, de uma ciência como produto pronto e acabado.

3.7 Aspectos para análise da controvérsia estudada

Na controvérsia estudada neste trabalho é possível identificar algumas das características discutidas neste capítulo, a exemplo da divergência entre teorias, da contestação de afirmações entre dois ou mais personagens antagônicos, a influência dos fatores não epistêmicos sobre o julgamento, digamos assim, de uma teoria central e sua posterior rejeição. Entretanto, algumas peculiaridades lhe conferem um caráter bastante singular, tendo em vista que a abordagem a ser apresentada é tanto internalista quanto externalista.

No caso do estudo do Princípio de Ação Mínima, nas controvérsias que o circundam, a partir da maneira como abordamos o episódio, se destacam aspectos internos à teoria e a identificação das influências dos fatores sociais, econômicos, políticos sobre as disputas ocorridas. Entendemos que alguns fatores são capazes de influenciar quando conseguem atuar de maneira significativa no andamento do episódio, seja trazendo contribuições positivas ou não.

Não se pretende neste trabalho encontrar uma sistematização para o estudo da controvérsia escolhida, porém, vale ressaltar que na literatura vigente, poucos estudos se preocuparam em oferecer critérios fixos para a análise de controvérsia. Critérios que ajudem a indicar quais os fatores preponderantes para que se conheça os aspectos característicos da controvérsia, de que maneira deve-se olhar para os atores destas controvérsias, em que medida podemos nos deter às considerações sociais, enfim, quais as estratégias que provocam um melhor efeito da análise realizada, isto é, fatores que favoreçam uma boa análise.

Uma das referências encontradas neste sentido, que apresenta uma sistematização para a padronização das análises referentes às controvérsias, foi a pesquisa realizada por Markle & Petersen (1981) que resultou em uma espécie de protocolo com 57 questões relevantes para estudos dessa natureza.

A ideia da criação do protocolo pretendia facilitar comparações entre pesquisas realizadas e desenvolver generalizações sobre estas disputas e suas resoluções; além disso, o protocolo serviria de guia para análises retrospectivas dos dados existentes.

O protocolo é dividido em seis grandes áreas: *background*, personagens, estratégias e táticas, afirmações do conhecimento, afirmações de valor e resolução. Cada seção e seus

subitens tem seu grau de importância dependendo do tipo de análise da controvérsia que o pesquisador pretenda realizar. (MARKLE & PETERSEN, 1981, p.27-29).

Algumas das questões encontradas no protocolo servirão para a análise da controvérsia estudada, a exemplo das que seguem:

- a. Visão geral da controvérsia
- b. Forma da controvérsia
- c. Quando a controvérsia se desencadeou?
- d. Qual foi o ano de pico da controvérsia?
- e. Qual a natureza do desafio e as respostas ao ataque?
- f. Qual foi a reação inicial?
- g. Qual o problema inicial?

No Capítulo 6, a análise da controvérsia em torno da elaboração e da publicação do Princípio de Ação Mínima, objeto de estudo deste trabalho, tomará como base estes questionamentos, tanto para identificação de características marcantes da mesma, quanto para destacar a importância dos aspectos extracientíficos no seu estudo, a partir do conhecimento do cenário, dos personagens, das influências hierárquicas, entre outros componentes.

4. EPISÓDIO ESCOLHIDO - O PRINCÍPIO DE AÇÃO MÍNIMA

Os conceitos de minimização do tempo e do espaço percorrido pelos corpos e pela luz, principalmente, têm seus antecedentes na antiguidade, mas a formulação e utilização de um conceito de ação só ocorreram no século XVIII, mesmo a sua autoria sendo um tema obscuro e cheio de interesses e interessados.

A ideias do Princípio de Mínima Ação utilizado por Maupertuis para explicar a sua teoria, tem como precedentes as ideias acerca da natureza da luz, formuladas por Heron de Alexandria (Séc. I d.C.), Descartes (1596-1650), Pierre de Fermat (1601-1665), Isaac Newton (1642-1727), Leibniz (1646-1716) e Wolf (1679-1754) como representante das ideias de Leibniz. Estas ideias serviram e foram cruciais nas críticas e/ou formulação de conceitos que favoreceram ou não na aceitação deste princípio baseado na minimização da ação da natureza para a realização de seus fenômenos.

O conceito de ação mínima que temos hoje pode ser considerado como o produto do formalismo matemático apresentado por Euler (1707-1783) e, posteriormente, desenvolvido por estudiosos de sua época e de anos posteriores, a exemplo de Joseph Louis de Lagrange (1736-1813) e William Rowan Hamilton (1788-1856). A mecânica analítica que conhecemos hoje advém desses estudos e pode ser aplicada à mecânica, ao eletromagnetismo e às teorias da relatividade e quântica. É também a partir do Princípio de Ação Mínima que, utilizando o cálculo variacional, podemos encontrar as equações de Lagrange, de onde podemos obter como caso particular, a 2ª Lei de Newton. No entanto, o Princípio de Mínima Ação está relacionado na literatura atual ao nome de Pierre Louis de Maupertuis (1698-1759), considerado o seu precursor, embora seus trabalhos não apresentem resultados satisfatórios e o conceito utilizado por ele tenha sido anteriormente encontrado em trabalhos desenvolvidos por outros pensadores.

Vamos conhecer cada uma das teorias destes pensadores para compreendermos a que época surgiram determinadas ideias, por quem foram defendidas e como elas embasaram o Princípio de Ação Mínima.

4.1 O Princípio de Ação Mínima e sua aplicação à Óptica

4.1.1 O Princípio de Mínimo de Heron de Alexandria

O nome de Heron de Alexandria (século I d. C.) está relacionado a um número considerável de trabalhos. Heron se utilizava do conhecimento filosófico, das relações de proporcionalidade e do comportamento da natureza para tornar possível a realização de muitas atividades.

Dentre suas obras podemos citar O *Mechanica*, no qual realizou estudos importantes sobre as máquinas simples, o *Pneumatica*, no qual descreveu o procedimento de construção de mais de 70 aparatos construídos por ele, envolvendo princípios mecânicos e as propriedades do ar, o *Katoptrika*, contendo estudos sobre a refração da luz e as primeiras teorias de minimização do caminho percorrido pela luz, entre tantas outras obras. Aqui trataremos apenas das suas contribuições aos estudos da óptica.

Na sua época, um fenômeno bastante questionado e produto de muitos questionamentos era a igualdade dos ângulos de incidência e reflexão dos raios refletidos nos espelhos planos e convexos. É importante frisar que se acreditava que a visão⁶ seguia linhas retas a partir dos nossos olhos, o que quer dizer que a corrente da qual Heron fazia parte defendia o seguinte: que os raios que nos permitem observar o mundo a nossa volta eram emitidos pelo olho em linha reta, a exemplo dos escritos de Epicuro (341-270 a.C.) e Euclides (300 a.C.).

Os estudos de Heron de Alexandria, inserido no contexto de sua época, nos permitem destacar alguns aspectos relacionado à natureza da ciência, tomando por base os estudos de El-Hani (2006) e de Pumfrey (1991). Heron de Alexandria foi um grande nome da antiguidade, realizando estudos em várias áreas do conhecimento, como já foi mencionado, mas não o único. Seus estudos sobre a natureza da luz lhe permitiram elaborar julgamentos particulares, no entanto, outros pensadores ao seu tempo não concordavam com ele, explicavam o processo da visão com outros argumentos, pois a natureza não nos oferece evidências simples para que seja interpretada de uma única maneira. Além disso, as opiniões, as características do pensamento adotado por Heron na

⁶Outras opiniões acerca do comportamento da luz eram as do filósofo Leucipo de Mileto, que viveu por volta de 500 a .C., e acreditava que os objetos emitiam pequenas partículas (eidola), como se fossem películas que se desprendiam da sua superfície, levando informações sobre eles como a cor e a forma dos objetos, chegando aos nossos olhos ocasionando a visão. Essa ideia era comum a outros filósofos da mesma corrente, como Demócrito (a.C. 460-370 a.C.), Epicuro e Lucrecio (a.C. 98-55 a.C.). Além da ideia de Empédocles, a visão estava relacionada com o elemento fogo. Ele acreditava que um raio visual era emitido pelos olhos, como uma espécie de fogo interno, que ao encontrar os objetos trazia informações sobre eles, estes, por sua vez, também emitiam um tipo de fogo que carregava suas informações, como a cor e a forma. A ideia de que a luz era um fator determinante para que enxergássemos os objetos foi defendida apenas com os estudos de Aristóteles que acreditava na luz como uma qualidade dos corpos transparentes.

realização dos seus estudos, a linha de pensamento da qual Heron compartilha com aqueles que compartilham a essência do seu pensamento influencia nas afirmações feitas por ele, porque toda observação depende de uma expectativa preexistente, o que exclui a ideia de que é possível coletar dados livremente, sem que estejam carregados de influências.

Heron de Alexandria realizou estudos nos quais afirmava que a natureza não faz nada em vão e por isso, procura o menor caminho para percorrer uma distância entre dois pontos. Como a distância mais curta entre dois pontos é uma reta, e a luz deveria percorrer uma trajetória retilínea, seria conveniente aferir que a luz se propaga pelo caminho mais curto. Assim, o princípio explicado por ele era um princípio de distância mínima percorrida pela luz.

Em sua obra denominada *Katoptrika*, Heron escreveu sobre o estudo dos espelhos, a sua construção e as imagens formadas nestes instrumentos. Ele consegue demonstrar fenômenos até então não esclarecidos no que diz respeito à reflexão. Antes dos seus estudos, já se sabia que nos espelhos planos, convexos ou côncavos, os raios refletidos possuíam ângulos iguais aos de incidência (este foi um dos teoremas também demonstrados por Euclides nos seus estudos sobre espelhos). Conforme as suas ideias, os raios de luz possuem uma velocidade infinita e por isso, percorrem as menores distâncias possíveis. Para explicar isso, ele disse:

Pois depois de fechar os olhos nós olhamos para o céu, não demora nenhum tempo para atingir o céu. Logo que olhamos, vemos os astros, embora a distância seja infinita, por assim dizer. E mesmo que a distância fosse maior, aconteceria a mesma coisa, e assim é claro que os raios são emitidos com velocidade infinita. Por causa disso, eles não têm interrupção, nem desvio, nem quebra, mas se movem pelo caminho mínimo, ou seja, por uma reta. (COHEN, 1958, p. 262)

Posteriormente, ele esclarece como comprovar que os ângulos de incidência e de reflexão são iguais nos espelhos planos e circulares. Para ele, se a luz segue um caminho pelo qual os ângulos assumem essa característica, esse caminho é a menor reta, pois “de todos os raios incidentes e refletidos, os menores são aqueles que formam ângulos iguais nos espelhos planos e circulares” (COHEN, 1958, p. 262).

A explicação de Heron consiste no seguinte:

Sendo um espelho plano AB. O observador está posicionado em G. Se um raio incide sobre o espelho, GA, e o raio refletido é AD, dizemos que EAG e BAD são ângulos iguais. Analogamente, tomamos outro par de raios incidente e refletido, GB e BD.

Digamos que o primeiro par de raios, GA e AD é menor do que o segundo GB e BD. A descrição pode ser observada na Figura 1:

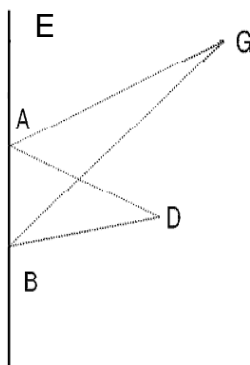


Figura 1: Representação de Heron de Alexandria para reflexão da luz por dois caminhos diferentes.

Agora, tracemos a partir de G uma perpendicular à AB, em seguida prolonguemos AD até que encontre esta perpendicular em Z. Em Z traçamos uma reta em direção à B, conforme a Figura 2.

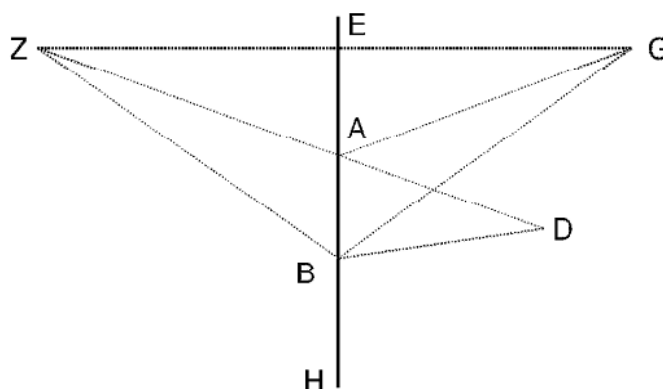


Figura 2: Esquematisação da reflexão da luz feita por Heron de Alexandria para provar o seu Princípio de Mínimo.

Por semelhança de triângulos sabemos que os ângulos BAD e ZAE são iguais, pois são opostos pelo vértice. Além disso, eles são iguais a EAG, pois em E os ângulos são retos. Conclui-se que ZA é igual a AG e, por analogia, ZB é igual a BG. Utilizando a notação atual, temos:

1. $\overline{ZD} < \overline{ZB} + \overline{BD}$
2. $\overline{ZA} = \overline{AG}$
3. $\overline{ZB} = \overline{BG}$ logo,
4. $\overline{GA} + \overline{AD} < \overline{GB} + \overline{BD}$ (1)

Do que concluímos que, sendo GA e AD menores do que GB e BD, e sendo o caminho seguido pela luz é o mínimo possível, este caminho é dado pela soma representada antes da igualdade.

Além disso, como:

5. $EAG = BAD$
6. $EAG < EBG$ temos que:
7. $HBD > BAD$
8. $HBD > EBG$ (2)

Ou seja, os ângulos de incidência e reflexão do menor caminho também são os menores.

(A demonstração é semelhante para os espelhos convexos).

Com essa demonstração, ele consegue provar que a luz percorre a mínima distância preferencialmente. Além disso, é importante notar que para Heron, não somente o raio menor possui os menores ângulos de incidência e de reflexão, mas existe um e apenas um raio incidente que pode ser refletido respeitando a igualdade destes ângulos.

4.1.2 A refração de Ptolomeu

Conforme mencionado no tópico anterior, desde o século I d.C., os trabalhos de Heron de Alexandria já esboçavam algumas ideias sobre a minimização das ações da natureza. Entretanto, a maioria das contribuições originais acerca da refração da luz e os princípios de minimização surgiram na idade média. No que tange às tentativas de explicação sobre o que acontecia no fenômeno da refração, um dos primeiros estudos acerca do comportamento da luz nesse fenômeno foi realizado por Ptolomeu, na sua obra *Óptica*.

No livro V Ptolomeu descreve e utiliza aparatos experimentais para mostrar o que acontece quando um raio visual incide em um meio e consegue ultrapassá-lo chegando a outro. Segundo ele, o raio visual só pode ser quebrado de duas formas: quando a reflexão de outros corpos consegue bloquear a passagem destes raios, o caso dos espelhos, ou quando outros meios, chamados transparentes, não bloqueiam totalmente a passagem destes raios.

Ptolomeu já afirmava que o desvio causado pela deflexão produzida devido ao modo como o meio permite a penetração, não ocorre igualmente para meios mais rarefeitos, ou menos densos, e os mais densos. Além disso, ele justifica que:

o raio visual só pode ser quebrado devido a uma resistência colocada pelas superfícies que separam meios com diferentes consistências e ocorre tanto na passagem [do raio visual] de meios rarefeitos para os mais densos, quanto dos mais densos para os rarefeitos. (...) a quebra não ocorre com ângulos iguais, mas os ângulos com a perpendicular mantêm entre si certa relação quantitativa consistente (COHEN, 1958, p. 271).

Na tentativa de explicar a relação quantitativa entre o ângulo do raio visual incidente e o “raio quebrado”, Ptolomeu realizou experimentos utilizando um recipiente (*baptistir*) vazio colocando ao fundo do mesmo uma moeda (em G). O sujeito que visualiza o recipiente não consegue visualizar a moeda, pois o raio visual que sai do seu olho (ABD) chega a um ponto mais elevado (D) do que o ponto onde se encontra a moeda. Então, quando for derramada água no recipiente, o mesmo raio visual citado anteriormente, agora será refratado até o ponto onde se encontra a moeda, fazendo com que a linha onde estava a moeda se apresente um pouco mais alta. A moeda é vista sobre a perpendicular traçada (LKG) desde a sua localização até a superfície da água. A Figura 3 permite-nos observar a visualização da moeda com o recipiente vazio e com água.

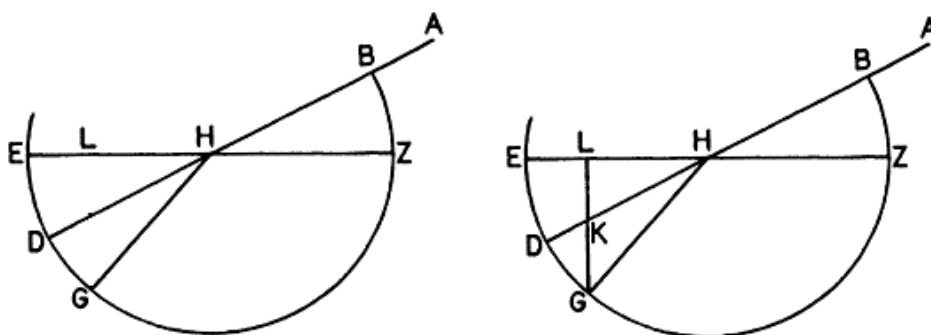


Figura 3: Esquema do experimento realizado por Ptolomeu para explicar a refração da luz entre dois meios diferentes quando o recipiente está vazio e quando está preenchido com água. Fonte: Notas de aula – autoria Roberto de Andrade Martins

Observamos que na água, o raio se aproxima da normal, o que se compreendia pelo fato da velocidade da luz na água ser maior do que no ar. Ptolomeu observou o comportamento dos raios visuais refratando em vários meios, do ar para a água, do ar para o vidro, da água para o vidro e entre meios com água a diferentes densidades. Nesta última observação, não notou diferenças tão sensíveis.

No caso de um meio mais denso para outro menos denso, da água para o ar, por exemplo, ele observou uma mudança considerável entre os ângulos de incidência e refração, e na deflexão angular que ocorre no momento da passagem do raio entre os meios. Entretanto, entre a água e o vidro não observou muita diferença, uma vez que a diferença entre a densidade destes dois meios não é tão apreciável.

Ptolomeu ainda investigou o comportamento dos raios visuais, ele estudou a inclinação dos corpos celestes quando estão mais próximos do horizonte, percebendo que entre o ar e o éter há um desvio visual de acordo com a diferença de densidade entre esses dois meios.

4.1.3 A analogia mecânica de Descartes

Além dos trabalhos de Ptolomeu, as ideias de Fermat (1601-1665), Descartes (1596-1650), Isaac Newton (1642-1727) e Leibniz (1646-1716) foram cruciais à formulação de conceitos de mínimo para explicar o comportamento da luz.

Descartes não acreditava na possibilidade de que houvesse ação entre corpos que não estavam em contato, ação a distância, isso não somente para a óptica, mas para a relação existente entre a terra e a lua, os magnetos, etc. Dessa maneira, as suas ideias eram contrárias às ideias de interação a distância de Newton.

A concepção cartesiana estabeleceu que a luz seria uma propriedade mecânica do objeto luminoso e do meio que transmite a luz, ela não consiste em um movimento real, mas em uma tendência ao movimento que é transmitida ao olho através do meio. Descartes acreditava que a luz era um tipo de pressão transmitida através do éter, pelo espaço⁷.

Entretanto, curiosamente, para compreender o comportamento da luz saindo de um meio de ar, atravessando a superfície da água ele se utilizou de um argumento teórico, explicado a partir de uma analogia mecânica. Embora ele não acreditasse no comportamento da luz como sendo corpuscular, a pressão a que se referia para explicar o que seria a luz na sua concepção possuía as mesmas propriedades dos corpúsculos, ou seja, as mesmas propriedades mecânicas. A sua analogia é explicada no seu livro *Dióptrica*, de 1637, da seguinte maneira: Supondo que uma pessoa tenha em mãos uma raquete e

⁷ O Universo cartesiano seria constituído por três tipos de matéria que apenas conservavam o movimento inicial recebido de Deus no ato da criação. Uma delas era que a matéria luminosa do Sol e das estrelas; o *plenum*, posteriormente chamado de éter que era matéria sutil, transparente e formava imensos vórtices que circundavam os planetas. Os vórtices também explicavam a propagação e a natureza da luz (MARTINS, 1988).

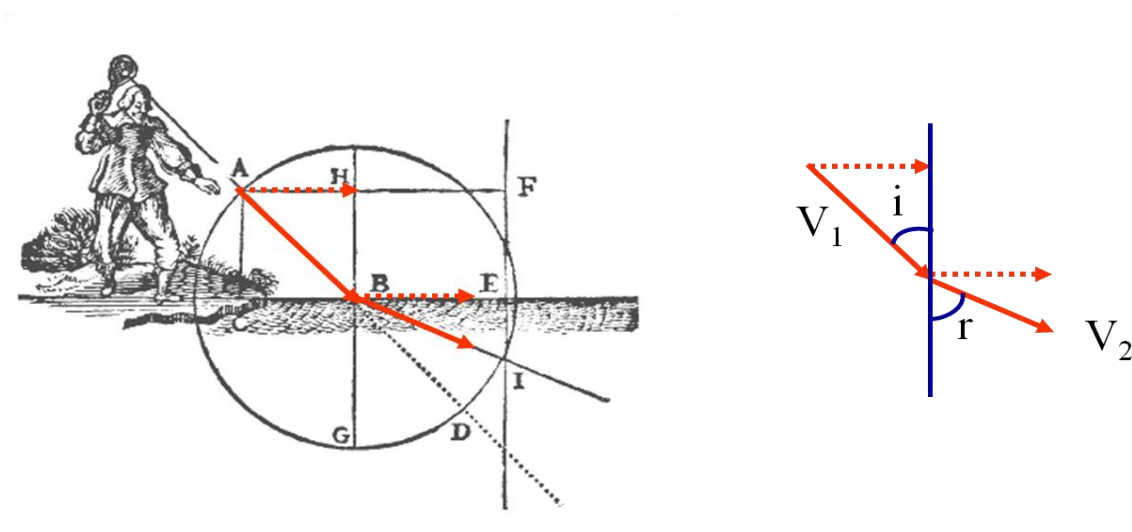


Figura 5: Análise geométrica da equivalência das componentes paralelas da velocidade da luz a partir da analogia feita por Descartes. Fonte: Arquivo em Power Point – autoria Roberto de Andrade Martins

$$v_1 \text{sen}(i) = v_2 \text{sen}(r)$$

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = \frac{v_2}{v_1} \quad (3)$$

Supondo que a razão entre as velocidades é uma propriedade dos meios, a razão entre os senos é uma constante. Além disso, de acordo com a análise da observação feita por Descartes, podemos observar que a resultante da velocidade da luz na água se afastou da normal à superfície, ou seja, intuitivamente, se a resistência na água é maior, a velocidade da luz na água é menor do que a sua velocidade no ar. Porém, a análise teórica do Descartes afirmava o contrário, ele defendia a ideia de que na água a velocidade da luz seria maior do que nos meios menos densos, a exemplo do ar (MAGIE, 1935, p. 269).

4.1.4 Fermat e o Princípio de Mínimo Tempo

Pouco mais de dez anos depois, em 1657, Pierre de Fermat, baseado nas ideias de mínimo de Heron, afirmou que a velocidade da luz em um meio mais refringente (mais denso) sofreria um decréscimo no seu valor, em relação a sua velocidade num meio menos refringente ou mais rarefeito. Ele propôs um novo princípio de mínimo propondo que a luz sempre percorre um caminho mais rápido, e não necessariamente o caminho menor sob o

ponto de vista geométrico, entre dois pontos dados, ou seja, no mínimo tempo possível. Dessa forma, ele estabelecia o que podemos chamar de Princípio de Mínimo Tempo (MAGIE, 1935, p. 279).

É importante fazer a seguinte consideração: os princípios de tempo e caminho mínimo só coincidirão quando estivermos tratando de um mesmo meio, ou seja, quando o fenômeno for de reflexão. Quando analisamos o percurso da luz no fenômeno de refração, é necessário considerar que a velocidade entre os dois meios por onde a luz percorrerá é diferente, logo, o tempo mínimo não necessariamente implica em termos uma distância ou caminho mínimo.

Os trabalhos de Fermat sobre a refração da luz foram publicados após o *Dióptrica*, de Descartes. Porém, como afirma Maupertuis:

Também ele ficou sem esperanças de deduzir os fenômenos da refração daqueles de um projétil lançado contra obstáculos ou movendo-se em meios resistentes. Mas não recorreu nem à atmosfera ao redor dos corpos nem à atração, embora saibamos que esse último princípio não lhe era desconhecido nem desagradável. Buscou a explicação desses fenômenos em um princípio bem diferente e puramente metafísico (MAUPERTUIS, 1744. p. 419).

No seu trabalho *Synthesis ad Refractiones*, Pierre de Fermat explicou a refração da luz aplicando ao fenômeno o seu princípio de mínimo. Nesse trabalho, Fermat mostrou que era possível deduzir a lei da refração encontrada por Snell e Descartes supondo que a luz possui velocidade maior nos meios mais rarefeitos do que nos meios mais densos, ideia contrária a de Descartes, admitindo que a luz percorre sempre o caminho no qual o tempo gasto é o mínimo possível. Ele foi o primeiro a elaborar e justificar o uso de um princípio de mínimo utilizando-se de uma justificativa matemática.

Fermat tomou um círculo com diâmetro $AFDB$, Figura 6, assumindo que essa mesma linha que separa dois meios, um mais rarefeito (ACP) e outro mais denso, AIP . Neste círculo, CD é o raio que incide no centro D de onde podemos encontrar o raio refratado, DI .

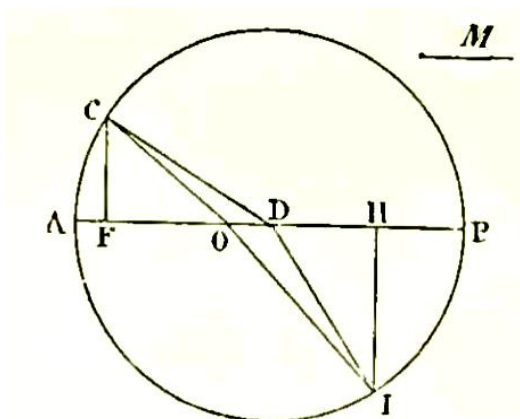


Figura 6: Círculo representativo utilizado por Fermat para explicar a refração de um raio de luz.

A fim de encontrar um resultado que concordasse com o teorema de Descartes para a refração, Fermat supõe que a razão entre a resistência do meio mais denso e a do outro meio, mais rarefeito pode ser dada pela razão entre a linha DF e M que é desenhada fora da Figura 6. Então, se para ele a velocidade no meio denso é menor do que a velocidade do raio no meio rarefeito, então $M < DF$. Ainda a partir das linhas M e DF , ele conseguiu medir o movimento ao longo das linhas CD e DI , representando o movimento completo pela soma dos produtos $M CD + DI DF$, o que é igual a soma dos produtos: (resistência do meio menos denso x o raio do meio menos denso) + (resistência do meio mais denso x raio do meio mais denso).

Neste momento ele se utiliza do seu princípio de mínimo dizendo que a soma que representa o movimento do raio incidente e o raio refratado deveria ser um mínimo, ou seja, admitindo que:

$$CD = n = DI \qquad DF = b \qquad DH = a ,$$

a quantidade

$$nm + nb = \text{mínimo} \quad (4)$$

Uma maneira de compreender como Fermat escreveu a lei dos senos é feita por Maupertuis, em um de seus trabalhos e reconstruída por Martins & Silva (2007, p. 456). Neste trabalho, os autores explicitam a lei dos senos como segue:

Tomando por base a ideia inicial de Fermat de que a luz se move mais lentamente nos meios densos, se a luz segue o caminho no qual o tempo é minimizado, a soma das distâncias divididas pelas velocidades nos dois meios seria mínima, ou seja, se no meio

mais rarefeito, como o ar, tivermos a velocidade v e a distância d , e no outro meio mais denso como o vidro ou a água, tivermos V e D ,

$$\frac{v}{d} + \frac{V}{D} = t + T = \text{mínimo} \quad (5)$$

O que nos levaria corretamente à relação direta obtida por Fermat, a lei dos senos, adotando o ângulo de incidência no meio mais rarefeito como sendo A e no meio mais denso, como sendo B .

$$\frac{\text{sen}A}{\text{sen}B} = \frac{V}{v}$$

4.1.5 Newton e a interpretação corpuscular

Isaac Newton, apesar de criticar algumas concepções cartesianas, concordava com as ideias de Descartes sobre a natureza da luz, tanto que na sua teoria aprimorou a dedução mecânica de Descartes e adotou a teoria corpuscular da luz. Dessa forma, ele explicou a refração como um caso particular de dinâmica da partícula onde os corpúsculos de luz sofrem uma atração maior na direção das partículas dos corpos mais densos, ou seja, seguindo a linha cartesiana, para ele a velocidade do raio de luz nos meios mais densos era maior (MOREIRA, 1999, p. 176).

Newton não deu importância aos princípios de mínimo. A explicação dada pela óptica Newtoniana para o comportamento da luz na refração era a seguinte: a luz considerada como constituída de partículas com alta velocidade, sofre uma força perpendicular à superfície de separação entre os dois meios transparentes, ao atravessar a região intermediária entre esses meios. Com isso, considerando a superfície como sendo lisa, pode-se concluir que a componente do momento da partícula paralela às superfícies deveria se manter constante, enquanto que, a partir da perpendicular, é possível deduzir a lei da refração, assumindo o inverso da relação encontrada por Fermat para as velocidades da luz nos dois meios, uma vez que para Newton a velocidade da luz nos meios mais densos do que nos mais rarefeitos (MARTINS & SILVA, 2007, p. 457).

Analogamente à reconstrução do raciocínio de Maupertuis, que se baseava em Fermat, Silva & Martins (2007, p. 456) também escreve a lei de Snell Descartes à luz das teorias Newtonianas. Como já foi dito, se Newton aceitava que as velocidades nos meios rarefeito e denso deveriam ser menor e maior, respectivamente, a relação entre os ângulos e as velocidades da luz deveria ser exatamente o inverso do obtido por Fermat. Assim:

$$\frac{\text{sen}A}{\text{sen}B} = \frac{v}{V}$$

4.1.6 Leibniz, o princípio de menor resistência e as causas finais

Leibniz tinha ideias contrária as de Fermat, pois acreditava que a velocidade da luz era maior nos meios mais densos. Apesar disso, o seu conceito de ação influenciou bastante os trabalhos do princípio de mínima ação proposto por Maupertuis.

Fazendo uma analogia com um jato de água podemos compreender como Leibniz explicava a velocidade da luz nos meios densos e rarefeitos. Para ele, as partículas de luz do meio mais denso estão mais unidas, impedindo a propagação do raio de luz, por isso, o fluxo de luz é acelerado como em um jato de água estreito, ou seja, quanto maior a resistência no meio maior a velocidade.

Durante o século XVII, os fenômenos físicos eram explicados pelas causas finais, porém Leibniz acreditava que existiam dois modos de estudar física: um por meio das causas eficientes (como ele classificou o modo como foi demonstrado o teorema de Descartes da lei dos senos) e por meio das causas finais, segundo o qual Fermat havia explicado a mesma lei, utilizando-se do princípio de mínimo tempo. (MOREIRA, 1999, p. 177; SILVA & MARTINS, 2007, p. 626)

O seu princípio de menor resistência nada mais era do que um princípio no qual a luz segue o caminho mais fácil para percorrer determinado meio, aquele no qual a resistência a sua passagem é menor.

Leibniz formulou uma ideia particular sobre a força exercida sobre os corpos em movimento, assumindo que esta força, que ele denominou de força viva, era o produto da massa multiplicado pelo quadrado da velocidade ou que era o quadrado da velocidade tomando a massa como uma unidade. (SILVA & MARTINS, 2007, p. 626)

Posteriormente, nas Memórias de São Petersburg, Christian Wolff, seguidor das ideias de Leibniz sugeriu multiplicar a força viva pelo tempo denominou este produto de

ação, afirmando que a ação dos corpos é o resultado das forças que eles exercem a todo instante. Leibniz associou às ideias de causas finais o seu conceito de ação, pois, segundo ele, como a presença divina se caracteriza pelas leis de conservação, a ação deve se conservar e não ser considerada um mínimo (D'ALEMBERT, 1752, p. 296).

4.1.7 As contribuições de Maupertuis: O princípio de ação mínima e sua aplicação à óptica

Os trabalhos de Maupertuis escritos em 1744 e 1746 tratavam do conceito de ação, o princípio definido por ele e algumas de suas aplicações na física. Basicamente, o Princípio de Mínima Ação de Maupertuis se constituía no seguinte: “Em qualquer mudança que ocorra na natureza, a quantidade de ação despendida por ela será sempre a mínima possível” (MAUPERTUIS, 1744, p. 422). Assim, sua descrição física explicaria os fenômenos com uma ideia de unificação.

No seu trabalho de 1744 intitulado “*Accord des différents lois de la nature qui vont jusqu’ici para incompatibles*” (*Acordo entre duas leis da natureza que até agora pareciam incompatíveis*), Maupertuis apresenta o seu princípio aplicando-o ao fenômeno de refração na óptica, tentando associá-lo às ideias de Fermat, de que a luz percorria sempre o trajeto no qual o tempo necessário seria o menor possível, uma vez que ele acreditava que a luz se move com menor velocidade nos meios mais densos. Como a ideia mais aceita no início do século XVIII era a de que a luz era composta de partículas e deveria se mover com velocidade maior nos meios mais densos, Maupertuis, na tentativa de conciliar as duas posições, propôs que ao invés de ser o tempo minimizado, a quantidade de ação para a luz realizar tal trajeto era que deveria ser mínimo.⁹

Maupertuis, ao descrever rapidamente os estudos de Snell, Descartes e Fermat, cita as três leis, denominadas por ele como as leis que descrevem o comportamento da luz. As leis eram a lei de propagação retilínea da luz, a lei da igualdade dos ângulos de incidência e reflexão da luz – ao encontrar um meio em que não pudesse penetrar – e a terceira, aquela que hoje conhecemos como a lei dos senos, afirma que o seno de refração está sempre na mesma razão com a seno do ângulo de incidência, quando a luz passa de um meio

⁹ Na época, existiam correntes que acreditavam que a luz era composta de partículas. Newton era um defensor dessa corrente. Ele acreditava na ideia de atração, ou seja, ele acredita haver uma tendência da luz em direção aos corpos. (MAUPERTUIS, 1744, p. 420)

transparente para outro. Baseando-se nelas, ele pretendia explicar o que ocorre no fenômeno da refração.

As explicações de Maupertuis estavam embasadas nas inquietações de Fermat¹⁰ e a tentativa de explicá-las utilizando-se da metafísica, afirmando que a natureza na produção de seus efeitos age sempre pelos meios mais simples. Assim, Maupertuis explicou o fenômeno de reflexão e a igualdade dos ângulos de incidência e reflexão, justificando então que a soma das duas linhas seria mais curta e percorrida durante o menor tempo possível. No entanto, o que ele pensava, e defendia, no caso da refração não correspondia às conclusões de Fermat. Maupertuis explicou que a luz se moveria mais rapidamente nos meios mais densos e, diante disso, argumentou que a luz não poderia preferir seguir o caminho mais curto ao trajeto mais rápido, uma vez que na reflexão, a luz, tanto percorria o menor trajeto, quanto o mais rápido.

Nas palavras de Maupertuis:

O caminho que ela [a luz] toma é aquele no qual a quantidade de ação é mínima. (...) Quando um corpo é levado de um ponto a outro, é necessário para isto uma certa ação. Essa ação depende da velocidade que o corpo tem e do espaço que percorre, mas ela não é nem a velocidade nem o espaço tomados separadamente. A quantidade de ação será tanto maior quanto maior for o caminho percorrido. Ela é proporcional à soma dos espaços multiplicados cada um pela velocidade com a qual o corpo percorre. É essa quantidade de ação que é aqui o verdadeiro dispêndio da Natureza e o que ela economiza o máximo possível no movimento da luz (MAUPERTUIS, 1744. p. 423).

O cálculo realizado por ele para provar que a quantidade de ação da luz na refração era um mínimo supunha dois meios diferentes, separados por uma superfície comum, representada por CD na Figura 7:

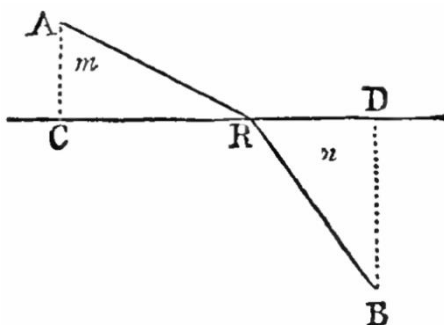


Figura 7: Representação da refração da luz. FONTE: MAUPERTUIS (1744, p.424).

¹⁰Na época, a ideia de Fermat consistia em apenas mais uma das existentes. Como representantes de mais duas correntes temos Descartes e Newton. O primeiro grupo, com representação de Descartes defendia na refração como um fenômeno que poderia ser explicado pela Mecânica, como que a luz fosse composta de partículas que ao encontrarem uma superfície, é ricocheteada, assim como foi apresentado no início deste Capítulo. O segundo, representado por Newton, acreditava que a luz possuía uma tendência em direção aos corpos – a atração presente em todos os corpos.

Sabendo que m é a velocidade da luz no meio superior e n a velocidade no meio inferior, para que a quantidade de ação seja mínima,

$$m(AR) + n(RB) = \text{um mínimo. (6)}$$

Como

$$AR^2 = (AC)^2 + (CR)^2 = AR = \sqrt{(AC)^2 + (CR)^2} \quad (7)$$

e

$$RB^2 = (DB)^2 + (RD)^2 \rightarrow RB^2 = (DB)^2 + (CD)^2 - 2(CD)(CR) + (CR)^2 \rightarrow$$

$$RB = (DB)^2 + \sqrt{(CD)^2 - 2(CD)(CR) + (CR)^2} \quad (8)$$

Substituindo (7) e (8) em (6), temos que:

$$m \left[\sqrt{(AC)^2 + (CR)^2} \right] + n \left[\sqrt{(DB)^2 + (CD)^2 - 2(CD)(CR) + (CR)^2} \right] = \text{mínimo}$$

Aplicando as condições de mínimo, fazendo a primeira derivada igual a zero, considerando AC, BD e CD constantes, encontramos:

$$m \frac{(CR)d(CR)}{\sqrt{(AC)^2 + (CR)^2}} - n \frac{(CD - CR)d(CR)}{\sqrt{(BD)^2 + (DR)^2}} = 0$$

$$\frac{(CR)(BR)}{(AR)(DR)} = \frac{n}{m}$$

Denominando o ângulo $C\hat{A}R$ e $R\hat{B}D$, como \hat{i} e \hat{r} , respectivamente, encontramos que:

$$\frac{(CR)}{(AR)} = \text{sen}\hat{i} \quad \text{e} \quad \frac{(DR)}{(BR)} = \text{sen}\hat{r}$$

Dessa maneira, escrevemos:

$$\frac{\text{sen}\hat{i}}{\text{sen}\hat{r}} = \frac{n}{m} \quad (9)$$

Essa relação é o que expressa a lei que hoje conhecemos com a Lei de Snell-Descartes para a refração da luz.

A ideia de Maupertuis era exatamente contrária às ideias de ação de Leibniz. Para ele, a luz ao atravessar um meio mais denso aumenta a sua velocidade. Isso poderia ser explicado pela teoria corpuscular que afirmava que ao penetrar um meio mais denso, a luz,

composta de partículas com alta velocidade sofria uma força que teria uma componente horizontal paralela à superfície que separava os dois meios, que seria nula, e outra componente do momento perpendicular a esta superfície que variava. Partindo desta consideração, Maupertuis chegou a uma lei de refração que relacionava os senos dos ângulos de incidência e de refração obtendo uma relação inversa a de Fermat (MAUPERTUIS, 1744, p. 422).

Com esse resultado, Maupertuis afirma que todos os fenômenos de refração, propagação e reflexão obedecem ao princípio em que a natureza, na produção de seus efeitos, age sempre pelas vias mais simples. Neste trabalho fica claro que Maupertuis, estando preocupado com as questões filosóficas, considera o uso do Princípio de Mínima Ação como um uso das causas finais, tentando dessa maneira, provar a interferência divina nos efeitos da natureza.

Este artigo, de 1744 (publicado em 1748), recebeu duras críticas de d'Arcy e d'Alembert quanto aos seus aspectos conceituais. D'Alembert foi o primeiro a criticar, e na Enciclopédia da qual foi um dos editores, escreveu no verbete 'ação': "É singular que tantos filósofos que escreveram sobre a refração não tenham imaginado um modo tão simples de conciliar a metafísica com a mecânica; bastava para isso fazer uma mudança muito leve no cálculo fundamentado sobre o princípio do Sr. de Fermat" (D'ALEMBERT, 1751, p. 120)

D'Alembert percebeu que Maupertuis não elaborou uma teoria pela qual chegaria a um resultado que lhe permitiria afirmar que a Natureza age pelas vias mais simples. Na sua interpretação, Maupertuis simplesmente manipulou conceitos, de tal modo que os seus resultados fossem convenientes com o que desejava mostrar. Aliar o que propunha Fermat e Newton era conveniente, uma vez que, assim ele atribuía o resultado a uma causa final, divina, além de permanecer fiel às ideias newtonianas (mecânica).

Dessa maneira, d'Alembert afirma que "de fato, é verdade que na reflexão em espelhos planos e convexos o caminho do raio é o mais curto possível; mas não ocorre o mesmo nos espelhos côncavos(...) em vez de ser o mais curto, é o mais longo." (D'ALEMBERT, 1751, p. 120)

A segunda crítica partiu de d'Arcy. Em 1752, ele escreveu um artigo que foi introduzido anonimamente com considerações acerca da simplória função das massas e velocidade que não seria suficiente nem para atribuir a isso o nome de "ação" nem para elevar um princípio metafísico através de hipóteses de cálculo. Neste artigo ele elaborou

várias críticas ao conceito de ação e à maneira como Maupertuis aplicou o mesmo ao estudo das alavancas e à colisão dos corpos.

Novamente, em 1752 o trabalho de Maupertuis foi atacado por d’Alembert, desta vez no segundo volume da Enciclopédia no verbete das causas finais. D’Alembert criticou fortemente as ideias de Maupertuis quanto à reflexão em espelhos convexos. No texto escreveu:

Eis, portanto, que o princípio das causas finais falha na reflexão. (...) por qual motivo **no caso da reflexão a natureza segue ao mesmo tempo o caminho mais curto e o tempo mais curto, porém na refração toma o tempo mais curto e abandona o menor caminho?** (...)Reconheçamos portanto o abuso das causas finais pelo próprio fenômeno que seus adeptos se propõe explicar com a ajuda desse princípio. (D’ALEMBERT, 1754, p.189 – grifos nossos)

Dessa forma, era fácil observar que o caminho percorrido por um raio que reflete em um espelho dessa natureza segue, muitas vezes, um caminho mais longo. Contrariando a ideia de tempo mínimo, ele também estaria sendo contra o princípio de ação mínima, uma vez que se o caminho da luz é o máximo, a ação também deveria ser um máximo.

Além das críticas à aplicação do princípio aos espelhos convexos, havia um problema com a refração dos raios. Nesse caso, o tempo é mais curto e o caminho não é o menor, ou seja, conforme escreveu D’Alembert (1752, p. 289) “Poder-se-ia dizer que ela [a natureza] precisou escolher, pois no caso da refração o caminho mais curto e o tempo mais curtos não podem estar em concordância. Está bem, mas por que preferir o tempo ao caminho?” A análise do uso das causas finais feito por Maupertuis é encontrada no verbete “causas finais” na Enciclopédia. Mais uma vez apresenta argumentos fracos sobre a justificativa do fenômeno usando a ideia das causas finais, uma vez que essa explicação só explicava um dos fenômenos e para apenas um tipo de espelho.

Estes assuntos tratados numa perspectiva filosófica provocavam estudiosos que se manifestavam com mais fervor, tendo em vista que as conjecturas fazem parte de um plano mais subjetivo, que envolve, muitas vezes, crenças e justificativas religiosas. Segundo Moreira (1999), estes tipos de pressupostos metafísicos, suas conexões ou a falta delas com as ideias científicas, os pressupostos filosóficos, as concepções religiosas e culturais variam com a época e o contexto no qual os pensadores e as suas aferições estão inseridos. Questionamentos quanto à aplicabilidade de técnicas matemáticas à descrição da natureza, a diferença entre uma afirmação científica e um pensamento metafísico, a validade das explicações dos fenômenos a partir do conceito de causas finais ou eficientes, incitaram

muitos debates e controvérsias acerca da aceitação de explicação do Princípio de Ação Mínima no decorrer da história (MOREIRA, 1999, p. 174).

Diante da importância de um princípio unificador, muitos pensadores não se posicionaram a favor deste raciocínio. D'Alembert e d'Arcy, por exemplo, não atribuíam quaisquer significados à ideia de associação do caráter teológico às explicações científicas.

Posteriormente, Maupertuis escreve o seu segundo artigo, intitulado *Les loix du mouvement et du repos déduites d'un principe métaphysique* (As leis do movimento e do repouso deduzidas de um princípio metafísico). Neste estudo, ele enunciou o seu princípio geral que dizia que qualquer mudança na natureza exige uma quantidade de ação necessária para que a mudança seja mínima e aplicou-o ao choques elásticos e inelásticos e ao equilíbrio das alavancas. Uma nova versão desse trabalho foi publicada em 1750 no seu livro *Essai de cosmologie*, mas esta não apresentava alterações significativas ao que já se conhecia do seu trabalho.

É importante deixar claro, mais uma vez, que uma das preocupações de Maupertuis era estabelecer, a partir de tais aplicações, uma evidência da existência de Deus, por isso justificava o princípio de ação mínima a ideia de causas finais. Por causas finais entende-se um fim para o qual um sistema tende, ou um objetivo ao qual se pretende chegar, a ideia de finalidade intencional. A influência da primeira ideia de causas finais, de Aristóteles, sobre o pensamento de Maupertuis pode ser observada. Segundo Aristóteles, as causas finais estão associadas a um princípio de simplicidade e autonomia, ou seja, a realização de uma forma mais simples possível.

Além da influência de Aristóteles, é possível identificar semelhanças nas ideias de Maupertuis, a do padre Malebranche (1638-1715). Assumindo que a conservação do movimento absoluto nas colisões era uma das leis básicas da física justamente pelo fato da sua simplicidade, assim como era a lei da inércia, o padre explicava a colisão dos corpos usando o conceito de impenetrabilidade dos corpos. Este conceito explica o fato dos corpos não penetrarem uns nos outros no momento de uma colisão.

Segundo Malebranche, isso aconteceria devido a uma intervenção de Deus que provocaria uma mudança nos movimentos dos corpos. A intervenção divina citada por ele é a ação que nos estudos dos aspectos físicos era representada pelo produto da massa pela velocidade e a distância que o corpo percorre. Usando-se do mesmo raciocínio, Maupertuis interpretava o choque dos corpos como um efeito de intervenção divina que exigiria a mínima ação possível para que se chegasse ao resultado final. A única diferença entre as

suas opiniões era que este último quis provar a existência de Deus a partir de demonstrações matemáticas do princípio de ação mínima (SILVA & MARTINS, 2007, p. 627).

4.2 O Princípio de Ação Mínima e suas aplicações à colisões dos corpos e ao equilíbrio das alavancas

4.2.1 As leis do impacto – Teorias anteriores ao trabalho de Maupertuis

A aplicação do Princípio de Ação Mínima, elaborado por Maupertuis, às colisões entre os corpos e ao equilíbrio da alavanca, foi apresentada em um trabalho publicado em 1746. Algumas das teorias que lhe serviram de referência foram desenvolvidas no século anterior por pelo menos três personagens: John Wallis, Christopher Wren e Christiaan Huygens. Em 1668 e 1669, a *Royal Society of London*, publicou uma discussão acerca das leis do impacto dos corpos. As ideias apresentadas eram de Wallis (1616-1703), que discutiu a colisão em corpos inelásticos (*Of the General Laws of Motion*), Christopher Wren (1632-1723) e Christiaan Huygens (1629-1695) sobre o impacto em corpos elásticos (*Of the Laws of Motion*).

4.2.2 John Wallis e os corpos elásticos

John Wallis começou a estudar ainda muito jovem, em 1625, quando entrou em uma escola de gramática em Tenterden, Kent, no Reino Unido, onde desfrutou de uma formação aprofundada em latim. Além de latim, ele aprendeu grego, hebraico e, apesar de estudar em uma escola de gramática, logo se interessou pelos elementos da lógica. Wallis graduou-se bacharel em artes no início de 1637, estudando também teologia, anatomia, física, astronomia, geografia e matemática.

Por alguns anos ele foi capelão privado e ministro em Londres. Por desempenhar serviços valiosos como o de secretariar para a Assembléia de Teólogos, ele foi nomeado professor de geometria em Oxford, em 1649. Para muitos foi uma surpresa, pois suas realizações até então, tinham pouco a ver com a matemática.

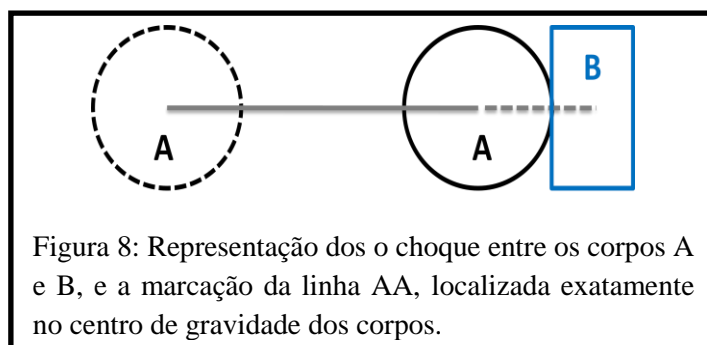
Uma das obras mais importantes escritas por ele é o tratado *Mechanica, sive de motu tractatus geometricus* (1669 - 1671). Nele ele realizou estudos sobre o cálculo de centros de gravidade, além de investigações acerca do movimento de corpos sob a ação da gravidade, e alguns problemas de impacto. Wallis estendeu suas investigações, estudando o comportamento dos corpos elásticos e inelásticos. Esta obra representou um grande avanço na matematização da mecânica, antecedendo os *Principia* de Newton. (SCRIBA, 2008)

A discussão feita por Wallis sobre o impacto dos corpos, em seu tratado, inicia com algumas considerações sobre a natureza dos corpos. No trabalho são apresentadas definições que diferenciam os corpos perfeitamente duros dos corpos macios e daqueles elásticos. Os corpos perfeitamente duros eram aqueles que não sofriam alterações em sua forma, nem perdiam nenhuma de suas características em qualquer momento de um impacto. Os corpos macios eram corpos do tipo da cera, argila, etc, que ao sofrerem algum impacto, se deformam, perdendo as características da sua forma original. A partir dessa caracterização, ele afirma que parte da força aplicada aos corpos dessa natureza, durante o choque, é usada para provocar essa deformação, por isso, a força não atua completamente no obstáculo que o corpo encontra. Como esse era um comportamento que se compreendia em termos de energia, era possível afirmar que a energia interna do corpo pode depender da sua deformação. A força viva perdida durante o impacto é equivalente ao calor provocado pelo mesmo.

A última categoria, os corpos elásticos, eram compreendidos como corpos que perdem a sua forma original no impacto, mas espontaneamente recuperam. Exemplo destes são as molas de aço que, logo após sofrerem uma deformação, se restituem.

No seu texto é possível encontrar algumas proposições acerca do impacto dos corpos macios. Por exemplo: um corpo, digamos um corpo A que se move ao longo da linha AA (esta linha une os corpos que entram em contato pelos seus centros de massa), colide com outro, o corpo B, que se encontra em repouso (este não se move nem é impedido de se mover por nenhuma força externa), conforme apresentado na Figura 8.

As velocidades e o peso de cada um dos corpos estão expressos em



seguida:

$p = \text{peso de } A$

$v = \text{velocidade de } a$

$p' = \text{peso de } b$

$v' = \text{velocidade de } b = 0$

o momentum do corpo que se move = pv

Depois do impacto, os dois corpos se moverão juntos com uma velocidade que é dada pela divisão do *momentum* pelo peso dos corpos juntos. O *momentum* é dado pelo produto do peso pela velocidade do corpo que se movem.

Assim, a velocidade comum aos corpos depois do impacto é dada por:

$$V = \frac{pv}{p + p'} \quad (10)$$

Um conceito importante utilizado por Wallis é o de *vis impellens*, ou força de impulsão, ou de impulso, que pode ser expressa exatamente pelo produto do peso do corpo pela velocidade do mesmo, (no caso do corpo A, pv), o que ele também chama de *momentum*. Dessa forma, a velocidade final encontrada anteriormente também pode ser a razão entre a *vis impellens* do corpo A, que experimenta a velocidade v e a soma dos pesos dos dois corpos. (DUGAS, 1988, p. 173)

É importante frisar que Wallis não fazia nenhuma distinção entre peso e massa dos corpos. Isso nos induz a tentar encontrar alguma semelhança com os conceitos de quantidade de movimento que vigora até os dias atuais.

As considerações apresentadas anteriormnte também foram utilizadas para compreensão da situação em que o corpo B agora se move com uma determinada velocidade, ainda muito menor do que a de A, na mesma direção. Assim, escrevemos a velocidade comum dos dois corpos depois do impacto assim:

$$V = \frac{pv + p'v'}{p + p'} \quad (11)$$

O que se obtém sempre pela divisão entre os momentos dos corpos pela soma dos seus pesos. Neste caso, temos que:

$p = \text{peso de } A$

$v = \text{velocidade de } a$

$p' = \text{peso de } b$

$v' = \text{velocidade de } b$

o momentum dos corpos que se movem = $pv + p'v'$

A terceira situação que ele pretende explicar é a referente ao impacto quando o corpo B agora se se move com uma dada velocidade na direção oposta. Isto é, se a velocidade de B é igual a $-v'$, a velocidade comum dos dois corpos é dada por:

$$V = \frac{pv - p'v'}{p + p'}$$

É fácil perceber que as três equações apresentadas podem ser escritas se tomarmos o que atualmente chamamos de conservação da quantidade de movimento no caso dos corpos elásticos.

Quanto à magnitude do impacto Wallis também elenca várias considerações, dentre elas, podemos destacar a seguinte:

- i. assumindo que em uma dada colisão, o corpo que colide possui a maior quantidade de momento, o corpo que recebe o impacto, recebe um momento tão grande quanto o que é perdido por este primeiro. Como os momentos perdido e recebido são produtos do impacto, é correto afirmar que o impacto é igual a duas vezes o decréscimo experimentado pelo maior momento (já que ele é igual ao ganho pelo outro corpo). (DUGAS, 1988, p. 175)

No caso dos corpos elásticos, Wallis se utilizou de um conceito de força elástica (*vis elástica*) para justificar o comportamento observado experimentalmente. A situação descrita por ele é a que segue:

ii. “Se um corpo colide com um obstáculo diretamente e se os dois corpos – ou apenas um deles – são elásticos, o primeiro corpo terá uma velocidade igual àquela que ele tinha antes do impacto e seguirá na mesma direção.”(DUGAS, 1988, p. 175)

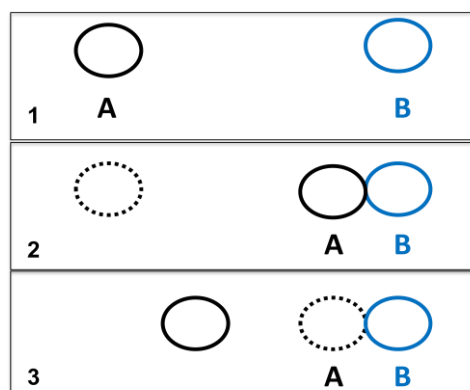
A justificativa para a utilização do conceito de força elástica foi de que se a elasticidade não existe em um corpo, ele deve se comportar como os corpos macios, e as explicações já apresentadas são satisfatórias, no entanto, neste caso, a elasticidade do corpo provoca a mudança na direção do seu movimento, uma vez que ele sofre um recuo e não continua a se mover junto ao outro corpo com uma velocidade comum. Diante dessa observação Wallis afirma que “a força elástica não resiste como um simples *impedimentum*, mas preferencialmente como uma força contrária reagindo com a mesma energia que a compressão exige” (DUGAS, 1988, p. 175)

Dessa forma, como a energia é a mesma tanto na compressão quanto na reação, é óbvio afirmar que o impacto para um corpo que possui velocidade v e um peso p é dado por:

no momento da colisão(2): pv

quando recua(3): pv

**A magnitude do impacto total
é igual a: $2pv$**



A figura 9 expressa graficamente a situação.

Figura 9: Representação da colisão entre dois corpos elásticos.

4.2.3 As contribuições de Christopher Wren

Christopher Wren veio de uma família com fortes tradições eclesiásticas, foi educado na Westminster School e em 1649 foi à Faculdade de Wadham em Oxford. Tornou-se íntimo de John Wilkins (que mais tarde foi bispo de Chester) e membro de um seleto grupo cujas atividades levou à formação da Royal Society. Depois de formado, foi eleito membro do All Souls College, Oxford, em 1653 e permaneceu na residência lá até 1657.

Wren tanto se interessava por astronomia que chegou a ser nomeado professor de astronomia na Gresham College, em 1657. Manteve-se professor lá até 1661, quando foi nomeado professor Savilian de astronomia na Universidade de Oxford, cargo que ocupou até 1673.

Wren é melhor lembrado como um arquiteto. Ele deu importantes contribuições à matemática, e foi considerado, juntamente com John Wallis e Christiaan Huygens como um geômetra importantes da época. Entre as suas contribuições à discussão promovida pela Royal Society, sobre as leis de impacto, Wren escreveu um conceito que denominou de velocidade própria dos corpos.

Estudando o impacto dos corpos, ele afirmou que os corpos possuíam uma determinada velocidade que era inversamente proporcional ao peso dos corpos. Além disso, o resultado do impacto entre corpos que percorrem determinada distância com as suas velocidades próprias seria a conservação desses valores. (SCOOT, 2008)

Ou seja, para ele, se a velocidade de um dado corpo R, antes da colisão, era maior do que a sua velocidade própria, devido a um determinado acréscimo, e, analogamente, se a velocidade de S era menor do que a sua própria devido a um dado decréscimo de mesmo valor do acréscimo na velocidade de R, então como resultado do impacto, depois da colisão, o mesmo valor subtraído de S deve ser acrescentado à sua velocidade, e deve ser subtraído da velocidade do corpo R o mesmo valor que havia sido acrescentado. (DUGAS, 1988, p. 175)

Assim:

$v_R = \text{velocidade própria de B}$ e $v_S = \text{velocidade própria de S}$

ANTES	DEPOIS
$v_R + x$	$v_R + x (-x)$
$v_S - x$	$v_S - x (+x)$

As velocidades v_R e v_S são as velocidades que ele denominou velocidades próprias dos corpos R e S.

4.2.4 As investigações de Huygens

As pesquisas de Huygens que tratam do impacto entre os corpos, foram publicadas em uma obra póstuma intitulada *De Motu corporum ex percussione* (Do movimento da percussão), no final da década de 1660. Este trabalho é fundamental na teoria do impacto dos corpos e tem como primeira motivação o fato de Huygens não concordar com algumas leis formuladas por Descartes no que se diz respeito à velocidade dos corpos em diferentes referenciais.

Descartes acreditava que seria possível medir a velocidade absoluta de um corpo, considerando-o em um referencial absolutamente em repouso. Para Huygens, todo movimento é medido em relação a um dado referencial e o seu estado de repouso absoluto depende de como se comporta este referencial. (BOS, 2008)

Para desconstruir a ideia de Descartes, ele realizou várias investigações e, inicialmente, elaborou três hipóteses que serviram de suporte para o seu trabalho. A primeira se referia ao princípio de inércia, e dizia que “Qualquer corpo em movimento tende a se mover em uma linha reta (com a mesma velocidade) por toda a sua extensão, se não encontrar nenhum obstáculo”; a segunda afirmava que os corpos que se movimentam um em direção ao outro e possuem a mesma velocidade, ao sofrerem uma colisão, permanecem com as mesmas velocidades; e a terceira, referente à relatividade do movimento dos corpos.

A sua terceira hipótese era contrária ao pensamento de Descartes que acreditava em uma velocidade absoluta dos corpos. Para Huygens, a velocidade dos corpos, o seu estado - de repouso ou de movimento - deve ser compreendido em relação ao referencial no qual se encontra. Como ele bem exemplifica, dois corpos podem participar de um mesmo movimento, no entanto, se eles estiverem sujeitos a um movimento uniforme, por exemplo, um observador que se encontra também em movimento uniforme observa o movimento como se a colisão dos corpos não estivesse submetida a este movimento. (DUGAS, 1988, p. 176)

Por isso, Huygens supôs uma situação na qual um experimentador dentro de um barco em movimento uniforme faz duas esferas que possuem velocidades iguais e opostas em relação ao barco, colidirem. Ao mesmo tempo, um observador posicionado na margem do rio também observa o movimento, como representado na Figura 10.



Figura 10: Movimento de duas esferas sob o ponto de vista de dois observadores. Esquema elaborado por Huygens para explicar a relatividade do movimento. Fonte: (HUGENII, 1703, p. 399)

Neste caso, os dois corpos colidirão e irão recuar com velocidades iguais apenas se tomarmos como referencial o barco, que embora se mova com movimento uniforme, esse movimento não é sentido pelas esferas, uma vez que elas também estão submetidas ao mesmo movimento. Isto nos leva a concluir que não existe movimento do barco em relação às esferas. Como Huygens afirma, é como se as esferas estivessem inicialmente em repouso. Ao contrário do observador que se encontra em terra firme, em repouso. As velocidades medidas por ele não serão iguais às medidas pelo experimentador porque o barco se move em relação à margem do rio na qual se encontra o observador.

Além dessa situação, são listadas várias outras em que justifica a relatividade do movimento dos corpos em colisões.

Em seguida, no mesmo trabalho ele faz considerações sobre o estudo das velocidades e do momento dos corpos em colisões (adotando como referencial a terra firme, no qual a velocidade não interfere na realização das observações), a exemplo das que seguem:

- i. Dois corpos iguais com velocidades diferentes, se movendo um em direção ao outro, mudam suas velocidades em um impacto direto.
- ii. No caso dos corpos desiguais, ele afirma que suas velocidades relativas se conservam quando se tratam de corpos elásticos. Além disso, a quantidade de movimento nem sempre se conserva.

- iii. Em uma colisão em que o corpo A é maior do que o corpo B, e B está em repouso, o corpo A transmite a ele uma parte de seu movimento, resultando assim na redução da velocidade de A, para que haja um acréscimo na de B.
- iv. Se na colisão o movimento de um dos corpos não é alterado, o outro corpo deverá manter o seu movimento. (DUGAS, 1988, p. 177-178)

Em uma das Proposições componentes do *De Motu*, Huygens demonstra o seu conceito de velocidade relativa dos corpos.

Na Proposição VIII ele diz: “Se dois corpos se movem em direções opostas e com velocidades inversamente proporcionais às suas magnitudes, e eles colidem, cada um recua com a velocidade que tinha antes do impacto” (HUGENII, 1703, p. 381)

Temos dois corpos A e B, sendo a magnitude de A maior do que a de B, que colidem um com o outro. A velocidade BC do corpo B está para a velocidade do corpo A, AC , assim como a magnitude de A está para a de B. Huygens pretendia mostrar que, depois do impacto os corpos recuariam com as suas velocidades AC e BC , ou seja, que a velocidade relativa se conservaria. Assim, ele escreveu:

Supondo que A é refletido com a velocidade $CD < AC$. Enquanto B recuará com a velocidade $CE > CB$ e $DE = AB$. Imagine que A adquire velocidade original AC através da queda de uma altura HA e que seu movimento vertical muda para um movimento horizontal com velocidade AC . Da mesma forma, suponha que B adquire velocidade através da queda de uma altura KB . Estas alturas estão na razão do quadrado das velocidades, isto é: $\frac{HA}{KB} = \left(\frac{CA}{CB}\right)^2$. Então supondo que depois do impacto os corpos A e B mudam seu movimento horizontal – com velocidades CD e CE – para movimento vertical para cima, e assim atingem os pontos L e M, de tal forma que $\frac{AL}{BM} = \left(\frac{CD}{CE}\right)^2$. Quando o centro de gravidade de A estiver em H e o de B em K, seu centro de gravidade comum estará em Q. Depois do impacto, este centro de gravidade está no ponto N. Agora, é possível mostrar que o ponto N é mais alto do que Q. (HUGENII, 1703, p. 381-382)

No entanto, o princípio de conservação das forças vivas, estudado na época, dizia que no movimento de todos os corpos sob a influência de seus centros de gravidade, o ponto no qual deveria se encontrar o centro de gravidade comum destes corpos não poderia ser mais elevado do que o centro de gravidade deles sozinhos, como representado na

Figura 11. Assim, a ideia de assumir que a velocidade de A seria $CD < CA$, implicaria num erro. De maneira análoga ele também conseguiu mostrar para o caso de $CE > CB$.

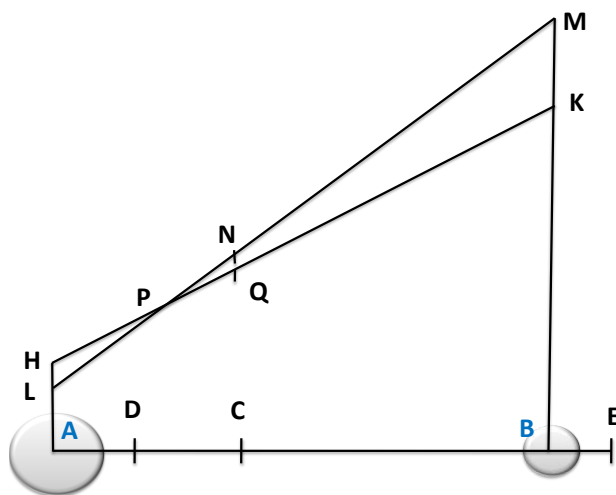


Figura 11: Representação do ponto N superior ao ponto Q, caso em que as velocidades de A e de B seriam $CD < CA$ e $CE > CB$, não se conservando assim, a velocidade relativa.

A partir disso, Huygens pode mostrar que a velocidade de recuo de A era realmente CA , assim como para B seria CB . A Figura 12 é a apresentada por ele no seu trabalho. Nela, o ponto N localiza-se abaixo de Q.

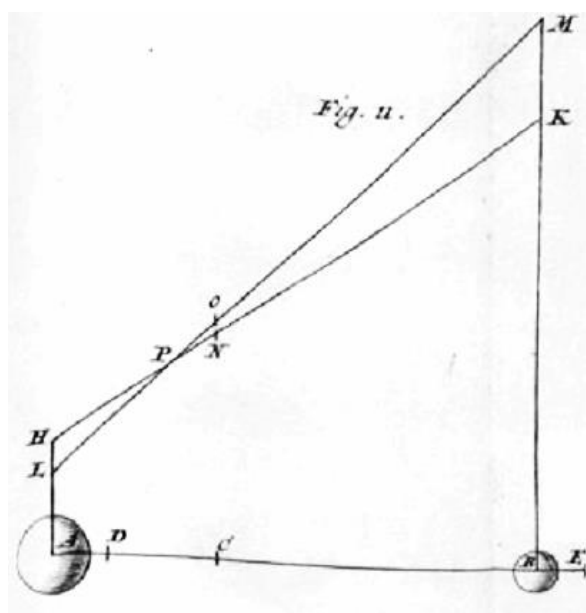


Figura 12: Representação do ponto Q superior ao ponto N.

Para chegar à conclusão de que as velocidades relativas antes e depois da colisão são iguais, Huygens assumiu também a reversibilidade de uma colisão com corpos elásticos. Da comprovação da igualdade das velocidades relativas ele também chegou a uma interpretação para a conservação da força viva, pois, se as velocidades se conservam, podemos afirmar que:

$$\textit{Antes } A(CA)^2 \textit{ e } B (CB)^2$$

$$\textit{Depois } A(CA)^2 \textit{ e } B (CB)^2$$

sendo as massa= A e B e as velocidade = CA e CB

Ou seja, o produto das magnitudes dos corpos pelos quadrados das suas velocidades se conserva.

4.2.5 As considerações de Maupertuis

No seu segundo artigo, Maupertuis aplica o seu Princípio de Ação Mínima ao caso das colisões em corpos elásticos e duros (inelásticos) e ao equilíbrio das alavancas. Intitulado “*Les lois du mouvement et du repos déduites dun principe metaphysique*” (As leis do movimento e do repouso deduzidas de um princípio metafísico), este trabalho apresenta também uma discussão acerca das provas aceitas por ele e por outros filósofos de sua época quanto à existência de um Ser Supremo que rege os movimentos dos planetas em torno do Sol, à organização dos seres vivos em comunidades e justifica a disposição dos órgãos do corpo dos animais e as suas finalidades, etc.

Maupertuis acreditava que seria possível identificar as provas da existência de uma Inteligência Suprema nas leis gerais da Natureza, em particular, as leis que regem o movimento, sua conservação, distribuição e destruição. Ele considerava um lugar favorável à possível existência desse Ser nos fenômenos universais que não permitem nenhuma exceção, mesmo sendo mais difícil de pesquisar nestes campos do que as simples especulações acerca do que se observa na natureza e não possui nenhuma prova rigorosa ou hipótese puramente geométrica. (MAUPERTUIS, 1746, p. 278)

Segundo Maupertuis (1746, p. 279) esses fenômenos universais teriam fundamentação matemática e, baseada em argumentos matemáticos, a existência de Deus teria a característica óbvia das certezas geométricas. Além disso, aqueles que duvidavam da argumentação metafísica acreditariam em um argumento matemático mais facilmente,

já que o que fosse passível de prova seria aceito com mais facilidade. “O Ser Supremo está em toda parte, vamos buscá-lo nas coisas mais simples, nas leis fundamentais da Natureza, nas regras universais pelas quais o movimento se conserva, é destruído ou distribuído.” (MAUPERTUIS, 1746, p. 279)

Neste sentido, Maupertuis (1746) tentava explicar, primeiramente, o que de fato acontece quando dois corpos se encontram. Para ele já estava claro, a partir da observação, que é necessária uma força para que um corpo encontre outro e altere o seu movimento, uma vez que a impenetrabilidade dos corpos já havia sido observada e o conceito de *força motiva*¹¹, para ele, por exemplo, nada mais era do que apenas uma “palavra inventada para suprir a nossa compreensão e não tem nenhum significado para além do resultado do fenômeno” (MAUPERTUIS, 1746, p. 280).

Ele acreditava que, nós, na tentativa de explicar o que de fato ocorre nos fenômenos, não consideramos o quão milagroso é o transporte de movimento de um corpo para outro. Dessa maneira, a partir da aplicação do seu princípio, ele buscou explicar porque um corpo quando colide com outro em repouso pode parar, recuar ou apenas se deslocar. “Afinal, O que é este poder que os corpos parecem ter para atuar em outro?” (MAUPERTUIS, 1746, p. 280)

Embora Maupertuis buscasse provar a existência divina, ele não concordava com as ideias que se baseavam apenas na justificativa dos fenômenos do movimento a partir da existência de um Ser Imaterial. Alguns defensores destas ideias eram Aristóteles, que identificava a causa original do movimento em um motor primário, numa causa primária que dava aos órgãos o poder de se mover.

O Padre Malebranche, na impossibilidade de explicar como o movimento dos corpos acontecia, argumentou que, quando os corpos movem outros corpos, ou conseguem batê-los ou pressioná-los, a intervenção divina é sempre necessária para a mudança e redistribuição desse movimento, uma vez que “o impacto não é nada além de uma inspiração de Deus”. (MALEMBRANCHE *apud* MAUPERTUIS, 1746, p. 282)

Para ele, estas ideias eram defendidas porque ambos não sabiam como explicar o movimento, e a única forma de explicá-lo seria através de justificativas que desconsiderassem que as leis do movimento e do equilíbrio eram fundamentadas no poder

¹¹ Que ele assumia como sendo apenas a capacidade que um corpo em movimento possuía de mover outros órgãos.

que a matéria possui para produzir, distribuir e destruir o movimento. O que Maupertuis queria era comprovar a existência de Deus, mas associando as explicações metafísicas às demonstrações matemáticas.

Conforme mencionado anteriormente, alguns filósofos já haviam realizados estudos na tentativa de explicar como se dava a distribuição do movimento nos corpos que experimentam uma colisão. Exemplo deles foram Descartes, que embora tenha se dedicado ao assunto, elaborou uma teoria falha que logo foi superada pelos estudos de John Wallis, Christopher Wren e Christiaan Huygens.

Os estudos destes filósofos concordavam no caso da distribuição de movimento na colisão em corpos elásticos, mas não no caso dos corpos não elásticos ou duros. Alguns acreditam na impossibilidade de distribuição do movimento neste último caso, outros chegaram a afirmar que estes corpos não existem, pois corpos duros são apenas corpos elásticos cuja dureza nos impede de observar a sua deformação e a recuperação de sua forma. (MAUPERTUIS, 1746, p. 283)

Uma das principais razões para negar a existência dos corpos duros era a incapacidade de derivar do seu movimento as leis de transferência do movimento.

As ideias de Descartes acerca da conservação da quantidade de movimento eram plausíveis, mas não para estes corpos. Além da conservação desta quantidade, outros filósofos a partir das leis do movimento, chegaram a outras leis de conservação, a exemplo da conservação da força viva. No entanto, esta quantidade só se conserva para corpos elásticos. Isso foi mais uma forma de tentarem confirmar a inexistência dos corpos duros ou inelásticos.

Para Maupertuis (1746, p. 284), nem as leis de conservação da Quantidade do Movimento, nem a da conservação da *força viva* eram princípios fundamentais, pois só se aplicavam a casos especiais e aos corpos elásticos, respectivamente. Assim, ele expôs mais uma vez o seu princípio, agora aplicando-o ao movimento e ao repouso dos corpos, assumindo-o como geral e fundamental, no qual todas as leis da natureza se baseiam. E mais, ainda conseguiu mostrar que poderia ser observado na mudança e na constância da Natureza de tal forma que a ação necessária, agora para que os corpos colidissem e para que um sistema fosse retirado do seu estado de equilíbrio, seria a mínima possível. Ou seja, o seu princípio além de universal, conseguia mostrar que a natureza sempre age pelas vias mais simples, isso graças à atuação de um Ser Superior.

É importante expor as condições apresentadas por Maupertuis em seu trabalho para a análise do fenômeno de colisão. Vejamos:

- i. Os corpos que colidem, sofrem esse choque diretamente, ou seja, como se considerássemos uma linha imaginária que une os centros de gravidade destes corpos. Isso pode ser considerado se os corpos são esfera sólida compostas de um material homogêneo.
- ii. Se um corpo em movimento encontra outro que está em repouso, o impacto será o mesmo se o segundo corpo se movesse com a velocidade do primeiro e encontrasse o segundo, agora em repouso. O que, utilizando a terminologia atual de cada grandeza, escrevemos da seguinte maneira:

$$v_1 = 0 \text{ e } v_2 = v \quad \text{ou} \quad v_1 = v \text{ e } v_2 = 0$$

- iii. Se dois corpos se movem em sentidos opostos e colidem, o impacto será o mesmo se tivéssemos um corpo em repouso e o segundo se movendo com uma velocidade igual à soma das iniciais. É o que hoje escreveríamos assim:

$$v_1 = v \text{ e } v_2 = -v \quad \text{ou} \quad v_1 = 0 \text{ e } v_2 = 2v$$

- iv. Se dois corpos se movem na mesma direção e colidem, o impacto seria o mesmo se estivessem um corpo em repouso e o segundo se movendo com uma velocidade igual à diferença das duas velocidades iniciais

$$v_1 = v \text{ e } v_2 = v' \quad \text{ou} \quad v_1 = 0 \text{ e } v_2 = v - v'$$

Expressando essa semelhança entre colisões e a mudança na velocidade dos corpos para cada situação Maupertuis pretendia mostrar que o impacto é o mesmo, devido às velocidades relativas¹² que tem o seu valor sempre constante, independente das velocidades individuais.

Agora vejamos as considerações dele acerca dos efeitos da elasticidade na colisão:

- i. Num corpo perfeitamente duro, as peças dele são inseparáveis e inflexíveis, o que justifica a incapacidade de alteração na sua forma.

¹²O conceito de velocidade relativa apresentado por ele pode ser compreendido como uma velocidade que é dada pela soma ou da diferença entre as velocidades dos corpos antes da colisão acontecer. Esse conceito já havia sido expresso nos estudos de Wallis e de Huygens.

- ii. Quando eles colidem, apenas as velocidades variam, devido à impossibilidade de deformação de suas partes. Assim, depois que se empurram, no momento do impacto, a velocidade de ambos é igual.
- iii. Num corpo perfeitamente elástico, as peças podem se deformar, no entanto o corpo consegue recompor a sua forma original.
- iv. Contrariamente aos corpos duros, estes têm suas partes deformadas, conforme descrito anteriormente, mas depois da colisão, eles recuperam a sua forma e se separam também com a mesma velocidade que se aproximaram, ou seja, as velocidades iniciais foram as únicas causas para o impacto, por isso, ao se recuperarem, eles causam um efeito igual ao que ocasionou a colisão e suas velocidades finais são iguais às iniciais, porém com sentido contrário.

Tomando como referência estes conceitos sobre a colisão dos corpos, neste segundo trabalho, Maupertuis expõe novamente o seu Princípio Geral e o aplica a estes conceitos e ao equilíbrio dos corpos dizendo que, dessa maneira, é capaz de encontrar as leis que regem a distribuição do movimento nos corpos quando colidem. Para tal, ele volta a afirmar que “quando ocorre qualquer mudança na natureza, a quantidade de ação necessária para essa mudança é a menor possível. A quantidade de ação é o produto da massa dos corpos por sua velocidade e pelo espaço que eles percorrem” (MAUPERTUIS, 1746, p. 290)

Para o caso da colisão de corpos duros (inelásticos), ele escreveu:

Sejam dois corpos duros, cujas massas são A e B, que se movem para o mesmo lado, com as velocidades a e b , mas A sendo mais veloz do que B, de modo que o atinge e se choca contra ele. Seja a velocidade comum desses dois corpos, depois do choque, $x < a$ e $x > b$. A mudança que ocorre no universo consiste em que o corpo A, que se movia com a velocidade a , e que em certo tempo percorria um espaço = a , move-se apenas com a velocidade x e só percorre um espaço = x . O corpo B, que somente se movia com a velocidade b e apenas percorria um espaço = b , move-se com a velocidade x e percorre um espaço = x . (MAUPERTUIS, 1746, p. 290-291)

Segundo Maupertuis, a mudança que ocorre no universo para o caso explicado anteriormente é a mesma que ocorre se agora, o corpo A que possuía velocidade a e percorria uma distância de a , fosse transportado para um plano sem massa e invisível, que

estivesse em movimento com uma velocidade $a - x$, por um espaço com a mesma magnitude e que, da mesma maneira, o corpo B se transportasse para um plano imaterial com velocidade $x - b$, percorrendo $x - b$ de distância, analogamente à A. A Figura 13 é uma representação esquemática dos corpos A e B antes e depois da colisão.

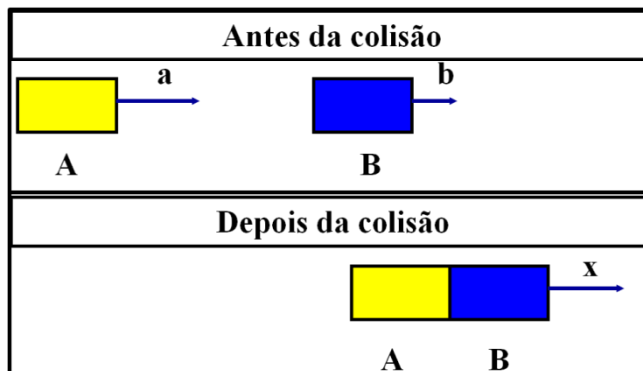


Figura 13: Representação esquemática dos corpos A e B antes e depois da colisão.

Agrupando os valores atribuídos às velocidades e às distâncias percorridas, conforme a sua descrição, temos:

	Corpo A	Corpo B
Massa	A	B
Distância percorrida inicialmente	a	b
Velocidade inicial	a	b
Velocidade final	x	x
Velocidade no plano imaterial	$a - x$	$x - b$
Distância percorrida no plano imaterial	$a - x$	$x - b$

Tabela 1: Valores das velocidades, das massas e das distâncias percorridas pelos corpos A e B em uma colisão entre corpos duros.

Assumindo que os movimentos dos corpos eram semelhantes nas duas situações, ou seja, que as velocidades próprias de cada um deles eram as mesmas, estejam os corpos em repouso ou se movendo neste plano imaterial descrito, Maupertuis afirmou que a quantidade de ação produzida pela natureza será $A(a - x)(a - x)$ para o corpo A, e $B(x - b)(x - b)$ para B. A soma das duas quantidades que representam a ação antes da colisão, deverá ser a menor possível.

Assim:

$$\begin{aligned}
 A(a-x)^2 + B(x-b)^2 &= \text{mínimo} \\
 A(a^2 - 2ax + x^2) + B(x^2 - 2xb + b^2) &= \text{mínimo} \\
 -2Aadx + 2Axdx + 2Bxdx - 2Bbdx &= 0 \\
 x &= \frac{Aa + Bb}{(A + B)} \quad (12)
 \end{aligned}$$

Esse raciocínio é correto e equivalente ao que fazemos atualmente quando assumimos a conservação da quantidade de movimento antes e depois da colisão entre os corpos A e B. A partir desse resultado ele concluiu que para corpos que se movem na mesma direção, a quantidade de movimento produzida é a mesma que a quantidade destruída, uma vez que a quantidade total do movimento se mantém a mesma depois do choque.

Para o caso em que a velocidade de B, por exemplo, tem direção oposta, a ação relativa ao corpo B é igual a $B(x+b)(x+b)$ e o cálculo da velocidade comum, x , é o seguinte:

$$\begin{aligned}
 A(a-x)^2 + B(x+b)^2 &= \text{mínimo} \\
 A(a^2 - 2ax + x^2) + B(x^2 + 2xb + b^2) &= \text{mínimo} \\
 -2Aadx + 2Axdx + 2Bxdx + 2Bbdx &= 0 \\
 x &= \frac{Aa - Bb}{(A + B)}
 \end{aligned}$$

Se um desses corpos, mais uma vez o corpo B, por exemplo, estiver em repouso, ou seja, a velocidade seja igual a 0, o resultado para a velocidade comum será:

$$x = \frac{Aa}{(A + B)}$$

A última situação é a seguinte: Caso um dos corpos, suponhamos que seja A, encontre um obstáculo impenetrável e que não se move, podemos considerar este último como sendo um corpo B com uma massa infinita. Dessa maneira, a velocidade comum é igual a zero, $x = 0$, uma vez que o denominador será infinitamente maior do que o numerador.

A segunda lei que Maupertuis procura é a lei que rege o movimento dos corpos elásticos. A situação descrita por ele é a seguinte:

Sejam dois corpos elásticos, cujas massas são A e B , que se movem para o mesmo lado, com as velocidades a e b ; mas A sendo mais veloz do que B , de modo que o atinge e se choca com ele; e sejam α e β as velocidades dos dois corpos depois do choque; a soma ou a diferença dessas velocidades antes do choque é a mesma que depois. A mudança que ocorre no universo consiste em que o corpo A , que se movia com a velocidade a , e que em um certo tempo percorria um espaço igual aa , move-se apenas com a velocidade α e só percorre um espaço igual a α . O corpo B , que somente se movia com a velocidade b e apenas percorria um espaço igual a b , move-se com a velocidade β e percorre um espaço igual a β . Essa mudança é, portanto, a mesma que ocorreria se enquanto o corpo A se movesse com a velocidade a , e percorresse o espaço $= a$, ele fosse transportado para trás sobre um plano imaterial, que fosse movido com uma velocidade $a - \alpha$, por um espaço $= a - \alpha$; e que enquanto o corpo B se movesse com a velocidade b , e percorresse o espaço $= b$, ele fosse transportado para a frente sobre um plano imaterial, que se movesse com uma velocidade $\beta - b$, por um espaço $= \beta - b$. (MAUPERTUIS, 1746, p. 292)

A consideração para as velocidades próprias dos corpos é análoga ao caso anterior. Para ele tanto no caso dos corpos duros quanto nos dos elásticos, as velocidades próprias de A e B não sofrerão mudanças quer eles estejam em repouso, ou em movimento sobre o plano imaterial suposto. Assim, ele calculou a ação dos corpos antes da colisão, somou-as e aplicou o seu princípio geral. A Figura 14 esquematiza a colisão dos corpos elásticos descrita anteriormente.

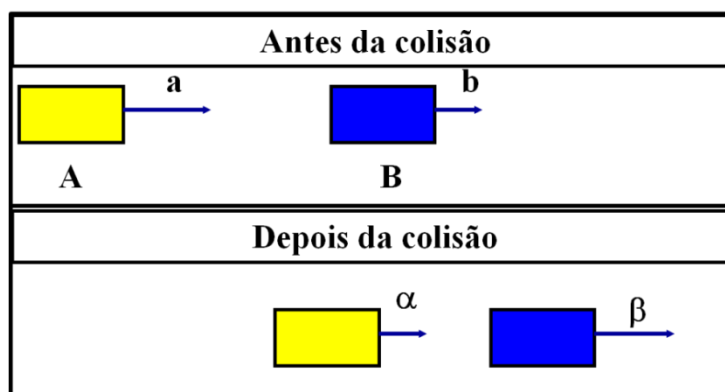


Figura 14: Esquema da colisão dos corpos elásticos A e B .

Agrupando os valores atribuídos às velocidades e às distâncias percorridas, conforme a sua descrição, temos:

	Corpo A	Corpo B
Massa	A	B
Distância percorrida	a	b
Velocidade	a	b
Velocidade final	α	β
Velocidade no plano imaterial	$a - \alpha$	$\beta - b$
Distância percorrida no plano imaterial	$a - \alpha$	$\beta - b$

Tabela 2: Valores das velocidades, das massas e das distâncias percorridas pelos corpos A e B em uma colisão entre corpos elásticos.

Para o cálculo da quantidade de ação, temos que a soma das quantidades de ação dos corpos A e B antes da colisão deverá ser um mínimo, tal como segue:

$$A(a - \alpha)(a - \alpha) + B(\beta - b)(\beta - b) = \text{mínimo} \quad (13)$$

$$A(a - \alpha)^2 + B(\beta - b)^2 = \text{mínimo}$$

$$-2Aada + 2Aada - 2Bbd\beta + 2B\beta d\beta = 0$$

Para a colisão entre corpos elásticos, as velocidades relativas do início e do final são iguais, então:

$$a - b = \beta - \alpha$$

$$\beta = \alpha + a - b \quad (14)$$

$$d\beta = d\alpha$$

Mas se $d\beta = d\alpha$, temos:

$$-2Aada + 2Aada - 2Bbd\alpha + 2B(a - b + \alpha)d\alpha = 0$$

$$-Aa + A\alpha - Bb + Ba - Bb + B\alpha = 0$$

E a velocidade encontrada foi:

$$(A + B)\alpha = 2Bb - Ba + Aa \rightarrow \alpha = \frac{Aa - Ba + 2Bb}{A + B} \quad (15)$$

Agora para β , fazemos:

$$-2Aad\beta + 2Aad\beta - 2Bbd\beta + 2B\beta d\beta = 0$$

$$-Aa + A\alpha - Bb + B\beta = 0 \quad \text{para } \alpha = \beta - a + b, \text{ temos:}$$

$$-Aa + A\beta - Aa + Ab - Bb + B\beta = 0$$

$$(A + B)\beta = 2Aa - Ab + Bb \rightarrow \beta = \frac{2Aa - Ab + Bb}{A + B} \quad (16)$$

Se os se movem com velocidades contrárias, é necessário considerar a velocidade de um deles como sendo negativa, assim, podemos escrever:

Se a velocidade do corpo B é $-b$:

$$\alpha = \frac{Aa - Ba - 2Bb}{A + B} \text{ e } \beta = \frac{2Aa + Ab - Bb}{A + B} \quad (17)$$

Se um dos corpos estiver em repouso, teremos:

$$\alpha = \frac{Aa - Ba}{A + B} \text{ e } \beta = \frac{2Aa}{A + B} \quad (18)$$

Por fim, se um dos corpos, digamos o corpo A, colidir com uma barreira intransponível e pudermos compará-la a um dado corpo B com uma massa infinita em repouso, a velocidade $\alpha = -a$, ou seja, o corpo A terá a mesma velocidade que tinha antes de bater no obstáculo, porém com o sentido contrário.

Hoje sabemos que esses resultados podem ser obtidos fazendo as quantidades de movimento antes e depois das colisões serem constantes, ou seja, não apenas tomar a colisão no seu momento inicial, mas igualar os valores da quantidade de movimento antes dela acontecer e imediatamente depois do choque. No entanto, apesar de correto, Maupertuis se utiliza de um artifício que considera a medida das velocidades em relação a diferentes referenciais.

Assumir um plano que se move com velocidades $a - x$ e $x - b$ para o caso dos corpos duros, e $a - \alpha$ e $\beta - b$, para o caso dos corpos elásticos, é assumir diferentes referenciais para a localização dos corpos. E se os dois corpos se encontram em planos imateriais, assim como ele define, que se movem com velocidades diferentes, a soma de suas velocidades não é válida.

Além disso, diferentemente da sua aplicação aos fenômenos ópticos, quando Maupertuis considerou que a quantidade que deveria ser mínima era a quantidade total da ação, no início e no final, no caso das colisões, a ação considerada mínima é a quantidade de ação de cada um dos corpos antes da colisão, quando tomada em diferentes referenciais especiais.

Com isso, podemos afirmar que a teoria de Maupertuis continha falhas e o desenvolvimento e aplicação do princípio eram adequados aos resultados nos quais ele pretendia chegar. Do mesmo modo que ele se utilizou do raciocínio de Heron para deduzir o princípio de ação mínima para a óptica, ele também “burlou” os cálculos nestas aplicações, chegando a resultados corretos, mas se utilizando de demonstrações matemáticas com erros graves e, conforme nos aponta Silva & Martins (2007):

A interpretação que ele utilizou para o princípio da ação mínima, no caso das colisões, é diferente da interpretação que ele havia utilizado antes para a refração da luz. No caso da óptica, ele considerou que a ação total (soma da ação inicial com a ação final) era mínima; no caso da mecânica, considerou que a mudança da ação, calculada em relação a referenciais especiais, era mínima (SILVA & MARTINS, 2007. p. 630).

Além das duras críticas acerca da validade de suas hipóteses, da não universalidade do princípio e, com isso, do fato de não provar a existência de um ser divino, Maupertuis e o princípio sofreram muitas críticas quanto à autoria e originalidade do mesmo.

No caso das alavancas, ele obteve uma lei dos corpos em repouso. A análise feita por Maupertuis considerava uma alavanca na qual seriam apoiados dois corpos e a pergunta feita por ele era: Qual deveria ser o ponto de equilíbrio da alavanca para o qual o menor movimento da alavanca exigiria a menor quantidade de ação?

Neste caso, têm-se dois corpos desiguais, com magnitudes iguais a A e B , presos às extremidades de uma alavanca de comprimento total igual a c . A distância entre o corpo A e o ponto de apoio da alavanca é igual a z . Assim, podemos dizer que a distância de B ao mesmo ponto de equilíbrio é dada por $c - z$. A Figura 15 apresenta um esquema desta descrição.

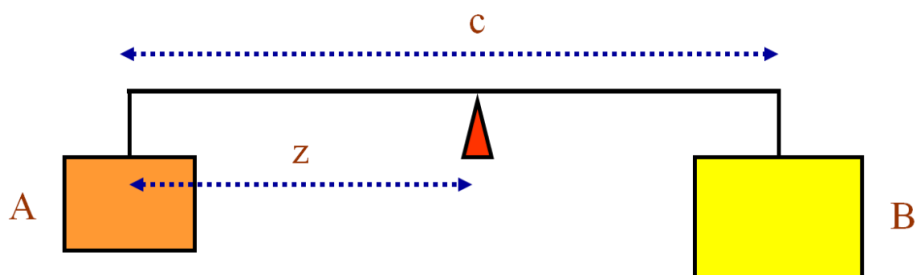


Figura 15: Representação de uma alavanca em equilíbrio. Fonte: Arquivo em Power Point – autoria Roberto de Andrade Martins

Maupertuis descreve também o movimento dos corpos em torno do ponto de equilíbrio da alavanca, relacionando os espaços e as velocidades percorridos por estes corpos da seguinte maneira:

(...) é evidente que, se a alavanca tiver um pequeno movimento qualquer, os corpos A e B descreverão pequenos arcos semelhantes entre si, e proporcionais às distâncias desses corpos ao ponto que se procura. Esses arcos serão espaços percorridos pelos corpos e representam ao mesmo tempo suas velocidades. (MAUPERTUIS, 1746, p. 293)

Para o cálculo da ação, temos que esta será igual ao produto da massa de cada corpo pelo comprimento do seu arco (espaço percorrido pelo corpo) e a velocidade para percorrer essa distância como segue:

$$Azz + B(c - z)(c - z)$$

$$Az^2 + B(c - z)^2 \quad (19)$$

Para o cálculo do mínimo deste valor, temos um resultado conhecido, que é a proposição fundamental da estática. Vejamos:

$$Az^2 + B(c - z)^2 = \text{mínimo}$$

$$Az^2 + Bc^2 - 2Bcz + Bz^2 = \text{mínimo}$$

$$2Azdz - 2Bcdz + 2Bzdz = 0$$

$$2zdz(A + B) = 2Bcdz$$

$$z = \frac{Bc}{(A + B)} \quad (20)$$

O primeiro ponto que nos chama atenção é o fato das segunda e terceira aplicações, aos corpos duros e elásticos, respectivamente, não serem semelhantes àquela para os fenômenos ópticos estudados no artigo de 1744 de Maupertuis. Neste trabalho, a consideração feita é que a ação total do movimento da luz para ir de um ponto A a um ponto B deve ser mínima, enquanto que nos casos das colisões a ação mínima é apenas a realizada pelos corpos antes do choque. Considerando a mesma condição, o resultado da soma *ação antes* + *ação depois* seria igual a:

$$Aa^2 + Bb^2 + (A + B)x^2 = \text{mínimo} \quad (21)$$

Se a derivada com relação ax deve ser igual a zero, teremos que:

$$2(A + B)x = 0 \quad (22)$$

O que produz $x = 0$. No entanto, a velocidade depois da colisão não é igual a zero. Dessa maneira, fica claro que Maupertuis tenta manipular as aplicações do seu Princípio, de tal modo que ele consiga chegar aos resultados pretendidos, por isso, tanto para os corpos duros e elásticos, ele se utiliza de uma mudança de referencial, calcula as variações das velocidades dos corpos e as ações associadas a essas variações para obter resultados satisfatórios.

Agora, tratando do caso do equilíbrio das alavancas, a situação se repete. A demonstração, assim como as outras feitas por ele, apresenta algumas falhas, tais como:

- A aplicação do princípio novamente apresenta características que mostram a não universalidade do mesmo. Ele vai supor agora que a quantidade de ação que deve ser minimizada é a ação total (do corpo A e do corpo B);
- A restrição para a mínima ação, pois, se para ele em qualquer mudança que ocorra na natureza a ação deverá ser mínima, ao deslocarmos o ponto de suspensão desta alavanca e a mesma girar, não assumindo mais a posição de equilíbrio, a ação também deverá ser mínima. Entretanto, a única situação na qual a ação é mínima, segundo o princípio de Maupertuis, é aquela na qual a alavanca encontra-se em equilíbrio.

Maupertuis admitia que o Princípio de Ação Mínima era um princípio geral que poderia ser aplicado aos corpos em movimento e em repouso. Dessa forma, o princípio deveria permitir que fosse aplicado se fossem supostas outras considerações iniciais. Todavia, segundo d'Alembert, quaisquer outras condições iniciais que sejam estabelecidas

fazem do princípio uma particularidade para as condições que foram usadas no trabalho de Maupertuis.

Por exemplo, mudando as variáveis, conforme observamos na Figura 16, supondo conhecida a distância de A até o ponto de equilíbrio e desconhecida o comprimento total da alavanca.

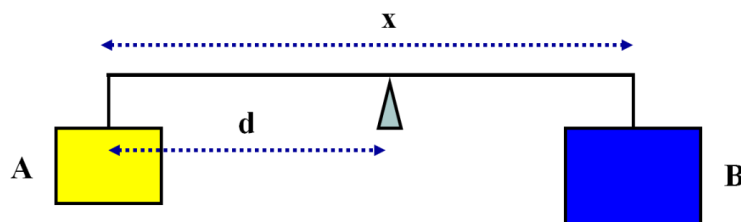


Figura 16: Representação de uma alavanca estudada por Maupertuis, supondo uma mudança de variáveis. A distância entre o corpo A e o ponto de suspensão da mesma indicada por d e o comprimento total indicado por x .

Assim, temos para o cálculo da ação total, teremos:

$$Ad^2 + B(x - d)^2 = \text{mínimo} \quad (23)$$

$$2B(x - d) = 0$$

$$x = d$$

O resultado encontrado caracteriza-se em um erro, uma vez que afirmar que x tem o mesmo valor que d é absurdo, pois o ponto de suspensão da alavanca se confunde com o seu comprimento total.

A demonstração, assim como as outras feitas por ele, apresenta falhas. A primeira delas fere diretamente a universalidade do princípio. Se Maupertuis admitia que o Princípio de Ação Mínima fosse um princípio geral que poderia ser aplicado aos corpos em movimento e em repouso, o princípio poderia ser aplicado, a partir de outras considerações iniciais.

D'Arcy também criticou este trabalho afirmando que a ação neste último caso não assumiria o mínimo valor, mas seria encontrada a partir de algo como, em termos atuais, a conservação do momento angular (SILVA & MARTINS, 2007a, p. 632).

5. ASPECTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa realizada divide-se em duas linhas de ação: uma teórica voltada para a apropriação conceitual dos conceitos relacionados à aplicação da História da Ciência no Ensino de Ciências e à compreensão do episódio estudado à luz das teorias sobre Controvérsias Científicas. Relacionando essas duas frentes, pretende-se que a abordagem do episódio histórico da nossa pesquisa aponte para a relevância de estudar a Física através do processo histórico, ressaltando o contexto sócio, político e cultural como elementos ampliem a compreensão do conceito. Além desta, ainda referente ao aporte teórico estudado, a apropriação da fortuna crítica que aborde os conceitos de Mecânica Analítica, no que diz respeito ao Princípio de Ação Mínima.

Para isso, foram consultadas fontes primárias para o contato com textos originais, a partir dos quais a leitura e interpretação não sofresse a interferência das ideias de pesquisadores autores de obras secundárias, embora este segundo tipo de obra também tenha sido consultada.

Neste caso elaboramos um Capítulo teórico, versando sobre os aspectos científicos do Princípio de Ação Mínima, considerando as contribuições de vários autores que antecederam a elaboração de dois trabalhos principais, os dois artigos publicados por Maupertuis. O primeiro destes artigos referia-se à uma aplicação do Princípio aos fenômenos ópticos. Para tal, apresentamos o panorama teórico que antecedeu e influenciou a escrita de Maupertuis. Da mesma forma fizemos para as ideias que antecederam o segundo artigo de Maupertuis, com aplicações agora voltadas à colisão dos corpos e ao equilíbrio das alavancas.

A outra linha de ação foi voltada para a produção de um material didático destinado ao uso do Professor nos cursos de formação de professores de Física.

O material elaborado compreende três Produtos¹³, sendo eles:

1. Material didático contendo uma discussão sobre o panorama anterior aos dois artigos de Maupertuis objetos de nossa pesquisa: Princípio de Mínima Ação e sua

¹³ Os Produtos compõem os Apêndices deste trabalho e estão disponíveis em <https://drive.google.com/folderview?id=0BzSXIKxOH5CUQm1HeWoxQ21NNU0&usp=sharing> para download. Neste endereço, o leitor poderá encontrar também os materiais sugeridos nas Sequências Didáticas.

aplicação à óptica e Princípio de Ação Mínima e sua aplicação às colisões e ao funcionamento das alavancas.

2. Material audiovisual, apresentando os aspectos extracientíficos que circundaram a elaboração do Princípio de Ação Mínima, na década de 1750.
3. Sequências Didáticas referentes à cada um dos Materiais didáticos mencionados acima;

Material Didático – Texto

A partir do nosso estudo teórico acerca do Princípio de Ação Mínima, elaboramos um material, com uma linguagem mais acessível ao professor do Ensino Superior e ao aluno em formação, com o intuito de lhe oferecer um material conceitual que abordasse a temática escolhida de forma clara e de fácil compreensão. Dessa maneira, elaboramos dois livretos, cada um deles discutindo aspectos relacionados a um dos trabalhos publicados por Maupertuis (os referidos na descrição presente no tópico 1). Além da discussão sobre os conceitos presentes nos trabalhos, neste material o professor encontrará os antecedentes conceituais que influenciaram, serviram de base para a elaboração dos conceitos do principal proponente apontado na literatura, Maupertuis.

O material é dividido em tópicos, de modo a facilitar a sua utilização nas aulas, podendo o professor organizar o tempo de discussão a partir da topicalização proposta. Além disso, ao final de cada tópico, fornecemos ao professor algumas questões para reflexão do conteúdo estudado. Assim, ao concluir cada um dos tópicos, como uma espécie de revisão, o aluno retomará os conteúdos estudados na sessão, compreendendo ao final de cada aula, o conteúdo apresentado. Além, disso, alguns questionamentos sugeridos indicam a possibilidade de discussão dos aspectos da Natureza da Ciência, apontados no Capítulo 2 e na apresentação dos módulos.

O primeiro deles, com o título O Princípio de Ação Mínima e suas Aplicações à Óptica, apresenta as contribuições de Heron de Alexandria, Ptolomeu, Fermat, Descartes, Newton e Maupertuis para os estudos sobre a reflexão e a refração da luz. Estes estudiosos são apresentados juntamente às suas contribuições para que se conheça qual o panorama existente até a publicação do Artigo de Maupertuis, *Acordo entre duas leis da natureza que até agora pareciam incompatíveis*, de 1744. Em seguida, apresentamos as considerações feitas por esse autor, neste trabalho. De modo semelhante, a elaboração do segundo

módulo, O Princípio de Ação Mínima e suas aplicações à Colisão dos Corpos e ao Equilíbrio das Alavancas, também traz as contribuições de estudiosos como Wallis, Wren e Huygens para o estudo da colisão dos corpos. Em seguida, o artigo de 1746 escrito por Maupertuis, *As leis do movimento e do repouso deduzidas de um princípio metafísico* é apresentado e as suas ideias são discutidas.

Vídeo

Para a elaboração do vídeo, tomamos como base, o estudo teórico sobre o episódio histórico, no tocante aos seus aspectos extracientíficos. O texto que tomamos por base foi o artigo *Voltaire, Maupertuis e o debate sobre o princípio de ação mínima no século XVII: aspectos científicos e extracientíficos*, (disponível na bibliografia). A partir dele, realizamos algumas edições, para que o texto adquirisse a estrutura de um roteiro.

Depois da elaboração do roteiro, foram estabelecidas as ações necessárias para a montagem dos quadros do vídeo, neste caso, quais os desenhos ganhariam forma e deveriam oferecer ao espectador a melhor ideia do que estava sendo narrado.

A elaboração foi dividida em três etapas: a pré-produção, a produção e a pós-produção. Na primeira delas, foi construída a sinopse, que compreende o resumo geral do que exibiremos no vídeo e o roteiro, contendo o detalhamento de tudo o que será apresentado no vídeo, quadro a quadro. A escrita do roteiro tem uma linguagem destinada a orientar a organização das imagens, neste caso, a serem projetadas simultaneamente, e, por fim, a construção do quadro de imagens, que geralmente é denominado *storyboard*. Neste momento são selecionadas as imagens, os elementos a serem apresentados no vídeo. Na etapa de produção se concentra toda a montagem das imagens a serem exibidas juntamente ao roteiro escrito que se constitui na narração. A sincronização entre os elementos de áudio e de vídeo é realizada nesta etapa.

Na etapa da pós-produção foram realizadas a edição, a organização das telas a serem exibidas, adotando a sequência final das imagens e do elemento de áudio correspondente.

A nossa proposta é unir os aspectos científicos e extracientíficos que permeiam a construção, aceitação e rejeição das ideias deste princípio durante o século XVIII. A partir dessa ideia central serão apresentados os cinco personagens principais envolvidos, as disputas que dão vida ao episódio, o cenário no qual acontece e o percurso que nos leva do

início da controvérsia até a sua conclusão, conforme indicado no roteiro apresentado no Apêndice.

Para a utilização do vídeo, também elaboramos uma sequência didática que oriente o professor à sua utilização, juntamente ao material descrito (artigo citado anteriormente) que o complementa, permitindo assim, uma discussão completa dos aspectos extracientíficos que permeiam este episódio.

Sequências didáticas

Para a utilização de cada um dos módulos didáticos e o vídeo, elaboramos uma sequência didática a fim de oferecer ao professor uma possibilidade de utilização dos módulos em sala de aula. A proposta é indicar caminhos possíveis para um melhor rendimento das aulas. Para a melhor compreensão das sequências, adotamos uma estrutura que apresenta ao professor o passo a passo que poderá seguir para alcançar os objetivos inicialmente delimitados.

A estrutura que utilizamos para elaborar as sequências, denominada “Desenvolvendo a sequência”, inicia-se com uma apresentação que compreende o tema, objetivos, conteúdo, material necessário e a descrição das atividades, de modo geral para a execução de toda a sequência. Em seguida temos, de forma detalhada, as etapas da mesmas, que por sua vez é dividida em blocos específicos. Vale salientar que não desejamos limitar o trabalho do professor, tão pouco apresentar uma receita para a abordagem dos conteúdos em sala de aula. A sequência serve como material que indica alguns passos e apresenta possibilidades para alcançar bons resultados.

As atividades propostas nas sequências dispõem de anexos contendo o material necessário para a realização das mesmas.

6. ANÁLISE DA CONTROVÉRSIA PRESENTE NO EPISÓDIO

Para o estudo e a abordagem da controvérsia em torno da elaboração e aceitação do Princípio de Ação Mínima, elegemos dois marcos principais no percurso do seu desenvolvimento: o primeiro, a elaboração do Princípio por Maupertuis, a partir da publicação dos seus trabalhos em 1744 e 1746, o que se explica pelas inúmeras críticas apresentadas por d'Alembert e d'Arcy, e, o segundo, o momento das críticas realizadas por König¹⁴, em meados 1750, também referentes ao mesmo conteúdo dos trabalhos de 1744 e 1746. Tratemos deste primeiro fato.

Pierre Louis de Maupertuis publica, em 1744, um trabalho no qual defende a ideia de que a natureza sempre age pelas vias mais simples, justificando essa teoria na existência de um Ser Supremo. Em seguida, Maupertuis publica outro trabalho, defendendo as mesmas ideias, no entanto, agora se referindo aos fenômenos de colisões e ao equilíbrio das alavancas. Os dois trabalhos foram amplamente criticados, uma vez que apresentavam teorias vazias, falhas e, por isso, fáceis de serem contestadas. As primeiras críticas partiram de d'Alembert e d'Arcy. Até este momento, os únicos personagens envolvidos eram os dois críticos, Maupertuis, presidente da Academia de Ciências de Berlim, e podemos mencionar o nome de Leonhard Euler, até então seu subordinado nas atividades realizadas na Academia.

Em primeiro lugar, a controvérsia se caracteriza pela divergência entre d'Alembert e Maupertuis, em seguida entre este e d'Arcy, quanto à validade de conceitos presentes na teoria do Princípio em destaque. Com isso, pode-se inferir que a controvérsia é científica de fato, uma vez que não temos nenhuma polêmica que interfere na sociedade, a exemplo daquelas citadas no início do Capítulo 3 e que são pertencentes à categoria das controvérsias quanto ao uso da Ciência. Aqui, temos uma teoria elaborada por um estudioso, que apresenta seus argumentos à comunidade científica e que, após as críticas poderá ter a adesão desta comunidade ou não.

A controvérsia tem características de um debate público, uma vez que as críticas foram feitas abertamente, por meio de cartas e da publicação de panfletos. Consequentemente, a comunidade científica da época foi dividida em grupos (não

¹⁴ O episódio referente a esta época é narrado no artigo de MARTINS & SILVA publicado na Revista Filosofia Unisinos, no ano de 2007. Para acompanhar a controvérsia descrita neste artigo, o presente trabalho fornece um material audiovisual versando sobre alguns pontos da controvérsia. O mesmo encontra-se nos Anexos.

necessariamente declarados) que apoiavam ou acreditavam nas teorias de Maupertuis, e outros adeptos às críticas do escritor da Enciclopédia, por exemplo. Até então, as críticas apontadas referiam-se apenas aos aspectos internos à teoria, aqueles epistêmicos ou ainda, aqueles relacionados às ‘hipóteses’ de background constitutivas e interpretativas.

Nesse caso, os desacordos eram evidentes nas críticas ao que compunha o sistema conceitual apresentado por Maupertuis. Os elementos utilizados por ele não satisfaziam aos críticos, no entanto, apesar de tecerem duras críticas, não elaboraram uma teoria contrária que explicasse melhor os fenômenos apresentados por ele. Ou seja, o desacordo existiu, mas não haviam dois grupos formados, destinados à batalha, mas sim alguns estudiosos da época que encontraram falhas no trabalho e resolveram criticar.

Até então, temos um momento em que a disputa envolve uma teoria atacada, duas opiniões a respeito do mesmo fenômeno, críticas expressas pública e persistentemente, o que confere ao episódio o status de controvérsia, pois, conforme citado anteriormente, Narasimhan (2001, p. 299) nos indica que uma controvérsia é “(...) uma disputa publicamente conduzida e persistentemente mantida por uma questão de crença considerada significativa por um número de cientistas praticantes”.

No segundo ponto, destacamos, em meados de 1750 as críticas recebidas por Maupertuis de um antigo colega, Samuel König. Neste caso, a divergência entre os dois não é resolvida apenas no âmbito epistêmico ou científico. As acusações de König dizem respeito à autoria do Princípio de Mínima Ação, até então atribuída a Maupertuis. Ao apresentar as cartas enviadas por Leibniz a Henzi, em 1707 nas quais o matemático comunicava o seu conceito de Ação e um Princípio de Mínimo semelhante ao proposto por Maupertuis, este último se sentiu ofendido e a ‘guerra’ estava declarada. É agora que outros personagens passam a ser protagonistas, a exemplo de Voltaire e o Rei Frédéric, diretor da Academia. De posse do episódio na sua completude, podemos discutir os demais elementos fundamentais que o tornam uma controvérsia científica em potencial.

A partir do estudo do episódio apresentado no Capítulo 4, e da descrição da controvérsia pode-se afirmar que a controvérsia é de natureza mista, conforme a literatura apresentada e amplamente discutida ao longo deste trabalho. A denominação mista pode ser justificada pelo fato da controvérsia possuir características das controvérsias de teoria, nas quais uma teoria é apontada como central e dois ou mais grupos divergem a seu respeito, alguns simpatizam por um conceito, outros pelo contrário, ou ainda, no que se refere à divergência teórica, utilizando-nos dos conceitos de Baltas (2000), algumas hipóteses de

background referentes aos elementos constitutivos e interpretativos, principalmente, não são compartilhados. Além disso, os aspectos externos, extracientíficos ou ainda relacionados ao que não é epistêmico, não podem (nem devem) ser desconsiderados neste estudo, a fim de não comprometer a compreensão e a influência destes fatores no desenvolvimento e na conclusão da controvérsia. Pode-se perceber a influência de aspectos relacionados à posição de Maupertuis na Academia, por exemplo, quando são tomadas decisões extremas no julgamento de Samuel König.

Dessa maneira, indicamos, explicitamente, qual o tipo de abordagem escolhida para tratarmos a controvérsia. Tendo em vista que ambas as contribuições e influências, externas e internas, são valorizadas e discutidas, as análises dos conceitos estão fortemente atreladas aos aspectos sociais, a exemplo das relações entre os personagens e suas posições sociais, o episódio é abordado nas perspectivas Internalista e Externalista. Se preferirmos utilizar o conceito de Brante & Elzinga (1990), a maneira como o episódio é discutido integra as abordagens:

- epistemológica-síncrona, aquela segundo a qual observamos o fato numa perspectiva da elaboração dos conceitos e sua estrutura epistêmica. As críticas de d'Alembert e d'Arcy foram de cunho científico e atacavam Maupertuis criticando a elaboração do seu trabalho, questionando-o quanto aos aspectos relacionados à coerência com a filosofia natural e aos estudos matemáticos;

- descritiva-diacrônica, que analisa a controvérsia a partir do curso do seu desenvolvimento, buscando compreender os conceitos, as teorias e os métodos utilizados para sua elaboração, à luz do ponto de vista aceito na época em que eles foram desenvolvidos. Além disso, estabelece uma ordem cronológica para os acontecimentos, assim temos como ponto de partida a publicação dos trabalhos de Maupertuis, em 1744 e 1746; o espaço entre essas publicações, perpassando pelas críticas, alianças, rompimentos, mudanças de opinião, denominado de desenvolvimento; e, por fim, o desfecho, quando o Rei Frédéric toma a decisão de expulsar Voltaire dos aposentos da Academia de Ciências de Berlim, dando como encerrado o embate, proibindo o escritor de voltar a tratar do assunto em qualquer circunstância.

- a abordagem político-contextual, que nos permite estudar a controvérsia localizando-a no seu contexto social, observando interesses sociais, políticos e econômicos. Para o episódio escolhido, podemos exemplificar com as considerações feitas a respeito do papel do Rei Frédéric na controvérsia, o abuso de autoridade de Maupertuis

por ser Presidente da Academia e a submissão de Euler devido à necessidade financeira, por exemplo.

Chegando ao desfecho da controvérsia, em se tratando do episódio relacionado à autoria do princípio, a controvérsia não foi resolvida, uma vez que até a morte dos seus personagens principais não se sabia se a carta escrita por Leibniz era realmente autêntica. Depois de muitas disputas, intrigas, discórdias, alianças, rompimentos, com a expulsão de Voltaire do Castelo do Rei e da Academia de Ciências de Berlim, a controvérsia teve o seu desfecho devido a um fator não epistêmico, ou seja, devido ao poder de uma autoridade. De posse dessas informações, para este momento, a controvérsia foi concluída e **encerrada**, pois não é possível identificar uma resolução. O que a encerrou foi uma intervenção de um personagem dotado de poder, o Rei Frédéric, que pode ser representada, com o símbolo da expulsão de Voltaire do Castelo do Rei.

Séculos depois, a carta original escrita por Leibniz foi encontrada nos arquivos dos irmãos Bernoulli. Neste ponto ainda é possível extrair outra característica importante. Durante o período do debate, essas cartas foram procuradas por toda parte, inclusive na casa dos irmãos Bernoulli, porém, nunca foram encontradas. Não se sabe se Maupertuis, abusando do seu cargo ou devido à amizade que tinha com os donos da casa, ordenou que elas não fossem divulgadas. Esta é mais uma confirmação do quanto os aspectos extracientíficos que permeiam uma controvérsia científica são, em muitos casos, fundamentais. Se as cartas tivessem sido encontradas, o desfecho da controvérsia seria outro completamente diferente.

Os aspectos que não são da ordem coletiva, externos à disputa, os que inferem sobre o comportamento humano, como menciona Martins & Silva (2007, p. 163), “os interesses, as estratégias retóricas, as alianças ‘políticas’, a luta de força entre os envolvidos” merecem destaque pelo poder que possuem para esclarecer como os fatores extracientíficos se configuram em aspectos imprescindíveis para a análise de qualquer episódio histórico.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante das discussões apresentadas, destacamos, primeiramente, a relevância do estudo bibliográfico realizado para a escrita deste trabalho, iniciado com as considerações acerca da utilização da História da Ciência como alternativa às aulas de ciências e a caracterização das controvérsias científicas. Partindo disso, situamo-nos na pesquisa atual a respeito da introdução da História da Ciência nas aulas de Física e dos estudos que contemplam a caracterização dos elementos de uma controvérsia científica.

Igualmente, os estudos permitiram associar as diretrizes apontadas nos documentos oficiais que regulamentam o ensino no Brasil aos estudos realizados na tentativa de levar às salas de aula a Ciência Física sob uma perspectiva histórica, possibilitando a compreensão da natureza da ciência a partir do estudo de controvérsias científicas.

A elaboração do roteiro nos serviu para compreender quais as etapas do desenvolvimento da controvérsia apresentam-se mais possibilidades para a apresentação visual de maneira atrativa aos alunos, apresentando todo o conteúdo, a partir das ideias principais, sem recorrer a generalizações e reducionismos.

Um fator preponderante, na realização da pesquisa foi perceber que com a nossa proposta de material, os alunos terão acesso ao Princípio de Ação Mínima, que muitas vezes não é abordado nas salas de aula do curso de Licenciatura em Física. E mais, o acesso a esta temática será por um viés diferente do que comumente se apresenta, priorizando apenas o tratamento matemático.

O capítulo referente às controvérsias nos ofereceu subsídios para a análise do episódio histórico identificando as características desse tipo de controvérsia, tais como, qual a importância dos elementos presentes na disputa, o papel das alianças existentes entre os personagens e, principalmente, o papel das influências que eles exercem uns sobre os outros para o desenvolvimento, aceitação ou rejeição das suas teorias.

Dessa maneira, o episódio histórico permitiu que explorássemos um leque de aspectos, por se tratar, primeiramente, de uma controvérsia. Assim sendo, seus elementos, após o estudo teórico, nos permitiram elencar os aspectos da Natureza da Ciência capazes de serem discutidos. Além disso, a ênfase nos personagens que contribuíram para a elaboração de um conceito, nos permitiu aprofundarmo-nos nos conceitos envolvidos, através de uma abordagem ao longo da história.

A análise da controvérsia à luz das considerações de Pumfrey (2001) e El-Hani (2006) quanto aos aspectos da Natureza da Ciência e das visões não deformadas do trabalho científico, apresentadas por Gil-Peréz (2001), nos permitiu traçar o perfil do episódio, apresentando aspectos tais como o fato dos desacordos serem sempre possíveis na ciência, que a elaboração, aceitação ou rejeição de um conceito envolve direta ou indiretamente a contribuição de vários personagens.

Os desacordos entre correntes que culminam na rivalidade entre os personagens são evidentes no caso do Princípio de Ação Mínima. Observamos que, enquanto Maupertuis, o personagem central ganha adeptos, a exemplo do Rei e do próprio Euler, no lado contrário, König conquista a adesão de Voltaire. Neste caso o que está em questão é a autoria do princípio e não uma disputa científica, no sentido de questionamento a respeito de um conceito. Para este caso, podemos citar as inferências de d'Alembert e d'Ary, no tocante à validade dos conceitos, apresentando em seus escritos pontos falhos da teoria, o que justifica uma divergência de opiniões entre duas correntes.

A partir dessa divergência também podemos identificar que episódios desta natureza são capazes de favorecer a desconstrução de ideias como as que dizem que a ciência é imutável, rígida e, por isso, infalível e individualista. A presença de vários personagens, não somente no episódio propriamente dito, mas em épocas anteriores, conforme apresentamos, evidenciam o processo contínuo de elaboração de teorias científicas. Como o Capítulo 4 nos apresenta, vários estudiosos se debruçaram para compreender os fenômenos que poderiam justificar a partir de teorias de mínimo. Alguns deles concordavam e outros não.

Com a elaboração do material didático juntamente às Sequências Didáticas, ainda incluindo a elaboração do roteiro e, em seguida, do vídeo pretendemos que o professor possa estar instrumentado, digamos assim, para o ensino dos conceitos abordados no episódio sob uma perspectiva histórica, tanto nas aulas de História da Ciência quanto nas de Mecânica Clássica. O aluno em formação poderá se apropriar dos conceitos físicos, conhecendo um dos exemplos de como se desenvolve o conhecimento científico, percebendo a Ciência como o produto da elaboração de ideias de seres humanos e não de gênios, assim como qualquer outro empreendimento de natureza humana, que não é produto de um único grupo ou de personagens isolados.

Atrelado a isso, a abordagem histórica favorece a possibilidade de contextualização dos estudos científicos à situação vigente, no que se diz respeito ao momento histórico, à

influência de personagens importantes, a exemplo do Rei Frédéric e sua posição na Academia de Ciências de Berlim.

Ainda no que se refere às influências dos personagens, foi possível estudar um episódio sob uma perspectiva que apresenta um conceito como ponto central de uma disputa envolta de fatores sociais, econômicos que, de certa forma, tornam-se determinantes para a tomada de algumas decisões. Podemos citar a situação de Leonard Euler na Academia e a posição assumida por ele. Sabemos que ele foi capaz de se omitir para não dar espaço à desavença com o presidente da Academia, uma vez que dependia dele para o pagamento de sua pensão (único meio de sua sobrevivência). Pelo mesmo motivo, a controvérsia ensaiou o seu desfecho quando Voltaire foi ameaçado pelo Rei quanto aos seus aposentos e toda regalia que usufruía na Academia.

Inserido neste processo de apropriação teórica e compreensão do episódio histórico escolhido, é fundamental observar o papel da elaboração de um Produto Educacional nesta pesquisa. O estudo teórico, a busca por referenciais que ampliassem a discussão, que favorecessem a escrita da proposta do trabalho, abriu caminhos para a elaboração de um material que foi além do corpo da Dissertação, propriamente dita. Foi neste momento que incorporamos à escrita, um material complementar, que acrescenta tanto à análise desse aporte teórico, quanto e, principalmente, ao desenvolvimento das atividades de um leitor que pretenda levar à sua sala de aula a nossa proposta. O Produto Educacional, além de se constituir numa exigência do curso (que assume o caráter Profissional), ainda se torna capaz de ampliar as possibilidades, de ir além de uma contribuição que se encerra em si mesma.

Compreendemos que os Produtos elaborados estenderam, quantitativa e qualitativamente o trabalho e favorecerão ao leitor tanto quanto ao conhecimento do episódio, poucas vezes apresentado e discutido nas aulas de Física, quanto pela possibilidade de criar um ambiente de discussões profundas acerca do que se expõe no material.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALTAS, A. Classifying Scientific Controversies. *In: Scientific Controversies: Philosophical and Historical Perspectives*. Oxford University Press, USA. 2000. p. 40-49.

BOS, H. J. M. "Huygens, Christiaan (Also Huyghens, Christian)." *Complete Dictionary of Scientific Biography*. 2008. *Encyclopedia.com*. 05 Oct. 2012 <<http://www.encyclopedia.com>>.

BRANTE T., ELZINGA, A. Towards a Theory of Scientific Controversies. *Sciences Studies*. Vol. 1 No. 2.

BRASIL. *Diretrizes Nacionais Curriculares para os Cursos de Física*. Aprovado em: 06 de Novembro de 2001. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES1304.pdf>>. Acesso em 20 de Março de 2014.

BRASIL. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*. Brasília, DF, 23 dez. 1996.

BRASIL. Parâmetros Curriculares Nacionais: ensino médio. Brasília, DF: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica, 2000. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/blegais.pdf>>

BROWN, S. C.; *Rumford, Conde [Benjamin Thompson]*. In *Dicionário de Biografias Científicas*. Benjamin Cesar; Editora Contraponto. Rio de Janeiro; 2007. p. 2371-2373.

CHALMERS, A. F. *O que é Ciência, afinal?* São Paulo: Brasiliense, 1993.

COHEN, M. R.; DRABKIN, Israel E. (eds.). *Heron*. A Source book in Greek science. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1958. p. 261-268.

_____. *Ptolomeu*. A Source book in Greek science. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1958. p. 268-283.

D'ALEMBERT, Jean Le Rond. "Action." *The Encyclopedia of Diderot & d'Alembert Collaborative Translation Project*. Translated by John S.D. Glaus. Ann Arbor: MPublishing, University of Michigan Library, 2006. Web. [13 de Outubro de 2011]. <<http://hdl.handle.net/2027/spo.did2222.0000.685>>. Trans. of "Action," *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, vol. 1. Paris, 1751.

D'ALEMBERT, Jean Le Rond. "Cosmologie." *The Encyclopedia of Diderot & d'Alembert Collaborative Translation Project*. Translated by Armando Manalo. Ann Arbor: MPublishing, University of Michigan Library, 2005. Web. [13 de Outubro de 2011]. <<http://hdl.handle.net/2027/spo.did2222.0000.542>>. Trans. of "Causes finales,"

Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, vol. 2. Paris, 1752.

D'ALEMBERT, Jean Le Rond. "Final Causes." The Encyclopedia of Diderot & d'Alembert Collaborative Translation Project. Translated by Armando Manalo. Ann Arbor: MPublishing, University of Michigan Library, 2005. Web.[13 de Outubro de 2011].<<http://hdl.handle.net/2027/spo.did2222.0000.542>>. Trans. of "Causes finales," Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, vol. 2. Paris, 1752.

DUGAS, R. *A History of Mechanics*. Translation of: Histoire de La mécanique. Editora Dover, 1988. p. 172-181.

EL-HANI, C. N. Notas sobre o ensino de história e filosofia da ciência na educação científica superior. In: Silva, C. C. (org.). *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. p. 3-21.

FERNANDES, F. *Dicionário Brasileiro Globo*. 30 ed. São Paulo: Globo, 1993.

FORATO, T. C. M. *Definindo parâmetro na transposição didática da história da ciência para o ensino de ciências: um estudo de caso a partir da teoria do éter luminífero no século XIX*. 2009. Tese (Doutorado em Educação) - Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009. v1. 204p.

GIL-PÉREZ, D. et al. *Para uma imagem não deformada do trabalho científico*. *Ciência&Educação*, 7(2), 2001, p. 125-153.

HUGENII, C. *De motu corporum ex percussione* In: Christiani Hugonii Zelemii, dum viveret, toparchae opuscula postuma, quae continent dioptricam. Commentarios de vitris figurandis. Dissertation em de corona & parheliis. Tractatum de motu., ETH-Bibliothek Zürich, 1703. p. 369-400. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-4066>> Acesso em: 06 de Outubro de 2012.

JOHNSON, S. *Cultura da Interface: Como o computador transforma nossa maneira de criar e comunicar/* Steven Johnson; Tradução, Maria Luiza X. de A. Borges, revisão técnica, Paulo Vaz. – Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2001.

KUHN, T. S. *A estrutura das revoluções científicas*. 1962. 5ª ed. São Paulo: Perspectiva, 1998.

KOENIG (König), Johann Samuel. *Complete Dictionary of Scientific Biography*. 2008. Disponível em: <Encyclopedia.com: < <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830902349.html>>. Acesso em 25 de Junho de 2011.

MAGIE, W. F. *Source Book in Physics*. New York and London. McGraw-Hill Book Company, Inc. First Edition – Fifth Impression, 1935.

MACHAMER, P. et al. *Scientific Controversies: Philosophical and Historical Perspectives*. Oxford University Press, USA. 2000 288 p.

MALUCELLI, V. M. B. *Formação dos professores de Ciências e Biologia: reflexões sobre os conhecimentos necessários a uma prática de qualidade*. Estudos de Biologia. 2007 jan/mar; 29(66). p. 113-116.

MARKLE, G. E., PETERSEN, J. C. *Controversies in Science and Technology: A Protocol for Comparative Research*. Winter, 1981, 6: p. 25-30. Disponível em: <<http://libres.uncg.edu/ir/uncg/listing.aspx?id=499>> Acesso em: 13 de Junho de 2013.

MARTINS, R. A. A Popperian evaluation of Einstein's theory-plus-method. *Manuscrito* 9 (2): 85-113, 1986.

_____. *Sobre o papel da história da ciência no ensino*. Boletim da Sociedade Brasileira de História da Ciência. 9: 3-5, 1990. Disponível em <http://ghtc.unicamp.br/pdf/ram-42.pdf>>

_____. *Abordagens, métodos e historiografia da história da ciência*. In: Martins, Ângela Maria (Ed.). *O Tempo e o Cotidiano na História*. São Paulo: Fundação para o Desenvolvimento Da Educação, 1993. (Série Idéias, 18). p. 73-8.

_____. *Descartes e a impossibilidade de ações à distância [Descartes and the impossibility of action at a distance]*. In: FUKS, Saul (ed.). *Descartes 400 anos: um legado científico e filosófico*. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 1998. p. 79-126. Disponível em: <http://www.ghtc.usp.br/server/pdf/ram-62.pdf>

_____. *Introdução: a História das Ciências e seus usos na Educação*. In: Silva, C. C. (org.). *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. p.xvii-xxx.

_____. *A maçã de Newton: história, lendas e tolices*. In: Cibelle Celestino Silva. (Org.). *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo, SP: Editora Livraria da Física, 2006, p. 167-189.

_____. *Teoria da relatividade especial*. [Theory of special relativity] Campinas: Grupo de História e Teoria da Ciência (GHTC), 2008.

MARTINS, R. A., SILVA, A. P. B. *Maupertuis, d'Arcy, d'Alembert e o princípio de ação mínima na óptica: uma análise crítica*. *Revista Brasileira de Ensino de Física* 29 (3): 453-461, 2007a.

_____. *Voltaire, Maupertuis e o debate sobre o princípio de ação mínima no século XVII: aspectos científicos e extracientíficos*. *Filosofia Unisinos*. v. 8, n. 2, p. 146-169, 2007b.

MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995. Disponível em: <http://www.fsc.ufsc.br/ccef/port/12-3/artpdf/a1.pdf>

MAUPERTUIS, P. L. Les Loix du mouvement et du repos déduites d'un principe metaphysique. In : *Histoire de l'Académie Royale des Sciences et des Belles Lettres (1746)*. p. 267-294

_____. Accord de différents loix de la nature qui avoient jusqu'ici paru incompatibles. In: *Histoire de l'Académie Royale des Sciences et Belles Lettres de Berlin*. 1748. p.417-426.

MOREIRA, I. C. Maupertuis (1698-1759) e o Princípio de Mínima Ação. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 21, nº 1, Março, 1999. p. 172-186.

MOREIRA, M. A. *A questão das ênfases curriculares e a formação do professor de Ciências*. Caderno Catariense de Física. Florianópolis Vol. 3 nº 2. Abr. 1986. p.61-116.

MOURA, B. A., SILVA, C. C. Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz? *Lat. Am. J. Phys. Educ.* Vol. 2. No. 3, Sept. Disponível em <http://ppgec.unb.br/images/sampled_data/dissertacoes/2011/proposicao/marcos_fernandes_s_obra.pdf>

NARASIMHAN, M. G. Controversy in science. *Journal of Biosciences*. 26(3): 299-304. 2001.

PIETROCOLA, M. (Org.). *Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora*. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005. 2. ed. rev. 236p.

PIETROCOLA, M. et al. *Física em contextos: pessoal, social e histórico*. 1. ed. São Paulo: FTD, 2011. v. 3. 1200 p.

PUMFREY, S. (1991). History of science in the National Science Curriculum: a critical review of resources and their aims. *The British Journal for the History of Science*, 24(1), 61-78.

REIS, P., GALVÃO, C.. Socio-scientific controversies and students' conceptions about scientists. *International Journal of Science Education*. vol. 26, nº 13, 2004.

RAMOS, M.B. , SILVA, H. C. *Para pensar as controvérsias científicas em aulas de Ciências*. Ciência & Ensino, v. 1, 2007.

REIS, P. R. *Ciência e Controvérsia*. REU, Sorocaba, SP, v. 35, n. 2, p. 09-15, 2009. Disponível em: <<http://repositorio.ipsantarem.pt/bitstream/10400.15/64/1/559-1301-1-PB.pdf>> Acesso em 08 de Dezembro de 2010.

RUMFORD, Count. *The Complete Works of Count Rumford*. An experimental inquiry concerning the source of the Heat which is excited by friction. Vol. I. Boston, 1870; p. 469-493.

SILVA, A. P. B., MARTINS, R. A. Maupertuis e o princípio mecânico de ação mínima: uma análise crítica. *Revista Brasileira de Ensino de Física* 29 (4): 625-633, 2007.

SILVA, B. V. C. *Controvérsias sobre a natureza da luz: uma aplicação didática*. Natal, RN. 2010. 180 f. Disponível em: <<http://ftp.ufrn.br/pub/biblioteca/ext/bdtd/BoniekVCS.pdf>> Acesso em 20 Abril de 2013.

SILVA, C. C. *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. 381p.

SILVA, C. C.; PIMENTEL, A. C. A. S. *Uma análise da história da eletricidade presente em livros didáticos: o caso de Benjamin Franklin*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 25, p. 141-159, 2008.

VELHO, L. e VELHO, P. *A controvérsia sobre o uso de alimentação 'alternativa' no combate à subnutrição no Brasil: analysis of a controversy*. *Hist. cienc. saude-Manguinhos*[online]. 2002, vol.9, n.1, pp. 125-157. ISSN 0104-5970.

SCOOT, J. F. *Wren, Christopher*. Complete Dictionary of Scientific Biography. 2008. Retrieved October 05, 2012 from Encyclopedia.com: <<http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830904727.html>>

SCRIBA, C. J. *Wallis, John*. Complete Dictionary of Scientific Biography. 2008. Encyclopedia.com. 05 Oct. 2012 from <<http://www.encyclopedia.com>>.