

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS - CFM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO CIENTÍFICA E
TECNOLÓGICA - PPGECT**

Gilmar Praxedes Daniel

**HISTÓRIA DA CIÊNCIA EM UM CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA:
A GRAVITAÇÃO NEWTONIANA E A GRAVITAÇÃO EINSTEINIANA COMO
EXEMPLARES**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Educação Científica e Tecnológica.
Orientador: Prof. Dr. Luiz. O.Q. Peduzzi

Florianópolis, SC
2011

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

D184h Daniel, Gilmar Praxedes

História da ciência em um curso de licenciatura em física [tese] : a gravitação newtoniana e a gravitação einsteiniana como exemplares / Gilmar Praxedes Daniel ; orientador, Luiz Orlando de Quadro Peduzzi. - Florianópolis, SC, 2011.
404 p.: il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências da Educação. Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica.

Inclui referências

1. Educação científica e tecnológica. 2. Ciência - Filosofia - História. 3. Filosofia da natureza. 4. Física - Estudo e ensino. I. Peduzzi, Luiz Orlando de Quadro. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica. III. Título.

CDU 37



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA EDUCAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
CURSO DE DOUTORADO EM EDUCAÇÃO CIENTÍFICA E
TECNOLÓGICA

“História da ciência em um Curso de Licenciatura em Física: a gravitação newtoniana e a gravitação einsteiniana como exemplares”

Tese submetida ao Colegiado do Curso de Doutorado em Educação Científica e Tecnológica em cumprimento parcial para a obtenção do título de Doutor em Educação Científica e Tecnológica

APROVADA PELA COMISSÃO EXAMINADORA em 08/04/2011

Dr. Luiz Orlando de Quadro Peduzzi (CFM/UFSC - Orientador)
Dr^a. Juliana Mesquita Hidalgo Ferreira (DFTE/UFRN – Examinador)
Dr. Roberto Nardi (FC/UNESP – Examinador)
Dr. Frederico Firmo de Souza Cruz (CFM/UFSC – Examinador)
Dr. José André Peres Angotti (CED/UFSC - Examinador)
Dr^a. Tatiana da Silva (CFM/UFSC – Suplente)
Dr. Marcelo Henrique Romano Tragtenberg (CFM/UFSC – Suplente)

Dr. José de Pinho Alves Filho
Coordenador do PPGECT

Gilmar Praxedes Daniel

Florianópolis, Santa Catarina, abril de 2011

DEDICATÓRIA

A minha família, em especial a Carla, minha esposa e minhas filhas, Clara, Ana Carolina e Isabel, por entenderem as longas ausências e pelo apoio dado durante a caminhada.

AGRADECIMENTOS

Em especial, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Peduzzi, pelo paciente orientação e importantes contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do PPGECT, pelas oportunidades de novas aprendizagens. Agradeço especialmente ao Prof. Dr. Frederico Firmo de Souza Cruz, pelo inestimável apoio filosófico. Obrigadão.

Ao Coordenador do PPGECT, Prof. Dr. José de Pinho Alves Filho, pela atenção dispensada. Muito obrigado.

Aos funcionários do PPGECT, em especial à Betty e Lúcia por todo o carinho e dedicação dispensados durante minha caminhada.

Aos professores doutores, José André P. Angotti e Arden Zylberstajn pelas valiosas críticas e sugestões no exame de qualificação.

Aos meus colegas do PPGECT, em especial, os da turma de 2006. Às minhas colegas de orientação, Danielle Nicodelli Tenfen e Marinês Domingues Cordeiro, pelas valiosas contribuições na fase final deste trabalho.

Aos professores doutores, Frederico F. de Souza Cruz, José André P. Angotti, Roberto Nardi e a Prof^ª. Dr^ª. Juliana M. H. Ferreira, membros da Banca Examinadora, pelos questionamentos, contribuições e estímulo à realização de novos trabalhos.

Aos professores, ex-alunos do Curso de Física da UEMS, Thiago de Oliveira Borges, José Alves de Oliveira Jr e Diego Moreira Rodrigues, pelas críticas e sugestões à aplicação de alguns materiais didáticos.

Ao professor e excelente companheiro de trabalho Nilson Oliveira da Silva pelo estímulo e contribuições à conclusão da investigação.

Aos meus alunos da disciplina Evolução dos Conceitos de Física que, a despeito de suas angústias e incertezas, deram uma valiosa contribuição à conclusão deste trabalho.

Aos amigos Edmilson de Souza, Marcelo Batarce e Adilson Crepalde, pelo valioso apoio moral e perene disposição para ajudar. Um agradecimento especial ao João Mianutti, parceirinho 100%, que me auxiliou e encorajou com grande lucidez e ilimitada paciência.

Aos amigos Julio Golin e Ana Carolina, pelo estímulo à conclusão deste trabalho.

À minha irmã Gilma Praxedes Aarão por sua bem humorada paciência e encorajamento.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

À Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS) pela oportunidade de formação.

À Fundect pelo apoio financeiro a uma expressiva parte deste trabalho.

Creio até que justamente aí está a razão da grande importância da história das ciências e do pensamento científico [...]. Ela nos revela o espírito humano no que ele tem de mais alto, em sua busca incessante, sempre insatisfeita e sempre renovada, de um objetivo que sempre lhe escapa: a busca da verdade, *itinerarium mentis in veritatem*. Ora, esse *itinerarium* não é dado por antecipação e o espírito não o percorre em linha reta. O caminho na direção da verdade é cheio de ciladas e semeado de erros e nele os fracassos são mais freqüentes do que os sucessos. Fracassos, de resto, por vezes tão reveladores e instrutivos quanto os êxitos. Assim, cometeríamos um engano se desprezássemos o estudo dos erros; é através deles que o espírito progride em direção à verdade. O *itinerarium mentis in veritatem*, não é uma via direta. Dá voltas, faz desvios, entra em becos sem saída, dá marcha ré. E nem mesmo é uma via, mas várias. A do matemático não é a do químico, nem a do biólogo, nem mesmo a do físico (ALEXANDRE KOYRÉ, 1961).

RESUMO

Nas últimas décadas, a relevância da história da ciência tem sido reconhecida por uma parcela significativa de pesquisadores da área de ensino de ciências. Entre eles, é consensual que o tratamento dos conteúdos científicos na educação formal deve potencializar uma reflexão sobre o processo histórico de produção e transformação dos conceitos e teorias científicas, ou seja, ao ensinar ciência é imprescindível ensinar sobre ciência. Para estes pesquisadores, um esforço didático-pedagógico nesta direção permitiria aos estudantes uma melhor compreensão da atividade científica, vinculando-a ao contexto de sua produção. Todavia, ao lado do reconhecimento do potencial educativo da história da ciência a pesquisa na área tem apontado alguns problemas e limites interpostos ao seu efetivo uso na educação científica. Um deles, por exemplo, situa-se no relativo descompasso entre o volume e qualidade das reflexões e propostas acadêmicas e seus desdobramentos no campo das ações empíricas em sala de aula, o que sinaliza a necessidade de se articular, de forma mais efetiva, a história da ciência à formação do professor, no caso do licenciando em Física. Nesta perspectiva, tendo como referência os estudos sobre transposição didática e os princípios educativos da dialogicidade e da problematização, elaborou-se e implementou-se uma proposta de ação didático-pedagógica. Esta foi materializada em uma sequência didática composta por duas unidades: a primeira, abordando a revolução copernicana e a gênese da gravitação newtoniana; e a segunda, contemplando as transformações nas teorias e conceitos científicos, que permitiram a emergência da gravitação einsteiniana. A experiência foi desenvolvida com um grupo de sete estudantes de um curso de licenciatura em Física de uma universidade pública, regularmente matriculados na disciplina Evolução dos Conceitos de Física. Para obtenção de dados empíricos foram utilizados questionários e entrevistas, sendo esses instrumentos elaborados e aplicados observando-se os procedimentos e recomendações pertinentes às abordagens qualitativas. A análise dos dados forneceu indicativos de que a intervenção didática contribuiu para que os estudantes desenvolvessem uma melhor compreensão acerca dos aspectos da natureza da ciência priorizados no trabalho, assim como a sua articulação ao ensino de física. No entanto, evidenciou-se também a vitalidade da concepção empírico-indutivista na estrutura cognitiva dos estudantes, sinalizando que um empreendimento como este não pode ser feito em uma única disciplina, mas deve ser negociado no curso, no

sentido de se tornar uma preocupação coletiva no processo de formação dos futuros professores.

Palavras-chave: História e Filosofia da Ciência; Natureza da Ciência; Ensino de Física.

ABSTRACT

In the last decades, the relevance of science history has been recognized by a significant number of researchers from the science teaching field. Amongst them, it is consensual that the treatment of scientific contents in formal education must potentiate reflection on the historic process of production and transformation of concepts and scientific theories. In other words, in teaching science it is essential to teach about science. Therefore, for these researchers, a pedagogical effort following this goal would allow students a better understanding of scientific activity, relating it to its production context. Although the educative potential of Science History, this research has pointed out and analyzed some problems hindering the effective use of it in scientific education. One of them, for example, is situated in the relative mismatching between volume and quality of reflections as well as academic proposal and their ramification in empirical field actions in the classroom. From this point of view, aiming at contributing to this debate, and having as background the Educational Transposition Didactic referential, one analyzed the absence of Science History, or better, its deformation in scientific education, especially in Physics Teaching. Having as reference, the educative principles of dialogicity and Problems Raising, one elaborated and implemented a didactical-pedagogical action proposal. This action was carried out in a didactical sequence made up by two unites: the first approaching the Copernican revolution and Newtonian gravitation genesis. The second deals with theories and scientific concepts transformation that allowed the Einstein gravitation come up. The experience was carried out with a group of seven students from Teaching Physics course, in the Evolution physical Concepts discipline. The making of instruments to the gathering of empirical data and intervention analyze followed the principle already used to the quantitative approach. The data analyzed let to know that tee didactical intervention contributed for the students to develop a better understanding on nature aspects of science prioritized in the work as well as its articulation to Physics Teaching. Nevertheless, one could also say that still exist empirical-inductivist traces in the students cognitive structure, indicating that the changes must be a concerning of the whole course, involving all disciplines in a continuous and colective process of negotiation aiming the formation of future teachers.

Keywords: History and Science Philosophy, Science Nature, Physics Teaching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A explicação copernicana do movimento retrógrado: a) planetas superiores; b) planetas inferiores.	125
Figura 2 - Modelo híbrido de Tycho Brahe	139
Figura 3 - Os sólidos platônicos e o modelo do universo kepleriano.....	141
Figura 4 - Os vórtex de matéria no universo cartesiano.....	160
Figura 5 - Esquema de Newton para um corpo em queda na Terra em rotação.	173
Figura 6 - AFGH é a trajetória elíptica de um corpo que não encontra resistência. A espiral interna, AIKLMNOPC, representa sua trajetória num meio que oferece resistência.	173
Figura 7 - Esquema de Newton demonstrando que a velocidade do planeta não varia com o inverso de sua distância ao Sol.....	175
Figura 8 - Um corpo em movimento inercial satisfaz a lei das áreas em relação a um ponto P externo à sua trajetória.....	178
Figura 9 - Esquema demonstrativo de que um corpo sujeito a uma força centrípeta instantânea atuando em intervalos de tempos regulares satisfaz à lei das áreas em um ponto.....	179

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resultados obtidos na Categoria 1(Interdependência entre teoria e observação e entre teoria e experimento).....	253
Quadro 2 - Resultados obtidos na Categoria 2 (A historicidade da ciência)...	264
Quadro 3 – Resultados obtidos na Categoria 3 (O caráter provisório, mutável e inventivo das teorias e conceitos científicos).....	276
Quadro 4 - Resultados obtidos na Categoria 4 (Contribuições da intervenção didática para a reflexão do aluno sobre o potencial educativo da história e filosofia da ciência no ensino de física).....	282
Quadro 5 - Desempenho dos alunos nas categorias	291
Quadro 6 - Resultados obtidos na Categoria 1(Interdependência entre teoria e observação e entre teoria e experimento).....	316
Quadro 7 - Resultados obtidos na Categoria 2 (A historicidade da ciência)...	325
Quadro 8 - Resultados obtidos na Categoria 3 (O caráter provisório, mutável e inventivo das teorias e conceitos científicos).....	336
Quadro 9 - Resultados obtidos na Categoria 4 (Contribuições da intervenção didática para a reflexão do aluno sobre o potencial educativo da história e filosofia da ciência no ensino de física).....	344
Quadro 10 - Desempenho dos alunos nas categorias	351
Quadro 11 - Desempenho geral da turma	376

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	23
1 HISTÓRIA DA CIÊNCIA, EPISTEMOLOGIA KUHNIANA E ENSINO DE FÍSICA	29
1.1 UMA VISÃO GERAL DO DESENVOLVIMENTO DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA NO ÚLTIMO SÉCULO	29
1.2 IMAGEM DE CIÊNCIA E HISTÓRIA DA CIÊNCIA.....	35
1.3 O DESENVOLVIMENTO DA CIÊNCIA SOB A PERSPECTIVA KUHNIANA	38
1.3.1 Críticas à epistemologia de Kuhn	43
1.3.2 Aproximações com a epistemologia de Kuhn	46
1.4 IMPLICAÇÕES PEDAGÓGICAS NA FORMAÇÃO DO FÍSICO – A EPISTEMOLOGIA HISTÓRICA DE KUHN E A EDUCAÇÃO CIENTÍFICA	52
2 CONSIDERAÇÕES EDUCACIONAIS	57
2.1 A FINALIDADE DA EDUCAÇÃO SUPERIOR E A FORMAÇÃO DE FÍSICOS	57
2.2 A NECESSÁRIA APROXIMAÇÃO ENTRE A CIÊNCIA E AS HUMANIDADES	60
2.3 A HISTÓRIA E A FILOSOFIA DA CIÊNCIA COMO INSTRUMENTOS DE REFLEXÃO PARA A SUPERAÇÃO DO SENSO COMUM PEDAGÓGICO	71
2.4 A CONTRIBUIÇÃO DA TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA À ANÁLISE DO ENSINO TRADICIONAL DE FÍSICA	75
2.4.1 Introdução	75
2.4.2 O conceito de Transposição Didática	77
2.5 A ARTICULAÇÃO DA HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA AO ENSINO DE FÍSICA E A BUSCA DE UM REFERENCIAL DE EDUCAÇÃO PROGRESSISTA.....	85
2.5.1 Introdução	85
2.5.2 Apresentação das premissas freirianas – a articulação da dialogicidade e da problematização ao ensino de ciências.....	88
3 HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA NO ENSINO DE FÍSICA.....	95
3.1 INTRODUÇÃO	95
3.2 ARGUMENTOS FAVORÁVEIS À UTILIZAÇÃO DIDÁTICA DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA	97
3.3 UMA REFLEXÃO SOBRE A SIMPLIFICAÇÃO E A DEFORMAÇÃO DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA NA EDUCAÇÃO CIENTÍFICA	101
3.4 A AUSÊNCIA DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA NO ENSINO DE FÍSICA À LUZ DA TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA.....	108

3.5 A GÊNESE DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL O SEU POTENCIAL EDUCATIVO E O SEU USO DIDÁTICO	114
4 A GÊNESE DA TEORIA DA GRAVITAÇÃO NEWTONIANA.....	121
4.1 INTRODUÇÃO	121
4.2 COPÉRNICO E O DESENVOLVIMENTO DE SUA CONCEPÇÃO HELIOCÊNTRICA	122
4.3 TYCHO BRAHE	134
4.4 JOHANNES KEPLER	139
4.5 GALILEU GALILEI	146
4.5.1 As observações telescópicas e a defesa do copernicanismo.....	146
4.5.2 A nova ciência do movimento – preâmbulo de uma física inercial	149
4.6 RENÉ DESCARTES	154
4.6.1 A conservação da quantidade de movimento e o princípio de inércia	158
4.6.2 A gravidade na física cartesiana.....	158
4.7 ISAAC NEWTON E A GRAVITAÇÃO UNIVERSAL.....	161
4.7.1 O contexto científico-filosófico encontrado pelo jovem Newton	161
4.7.2 A iniciação científica e filosófica do jovem Newton	163
4.7.3 As primeiras ideias de Newton sobre o movimento orbital e a terceira lei de Kepler	164
4.7.4 A “prova da Lua”, a história da maçã e o surgimento do mito da descoberta precoce da gravitação universal.....	167
4.7.5 A troca de Cartas com Hooke: uma nova compreensão para a dinâmica do movimento curvilíneo e a descoberta de um novo significado para a lei das áreas	172
4.7.6 Da força centrípeta à gravitação universal.....	181
5 AS LIMITAÇÕES DA GRAVITAÇÃO NEWTONIANA E A GÊNESE DA GRAVITAÇÃO EINSTEINIANA	189
5.1 INTRODUÇÃO	189
5.2 A RETOMADA DA CONCEPÇÃO ONDULATÓRIA DA LUZ E O DESENVOLVIMENTO DO ELETROMAGNETISMO.....	189
5.3 O ÉTER E A TEORIA ELETROMAGNÉTICA	194

5.4 O CONFLITO ENTRE O ELETROMAGNETISMO E A MECÂNICA NEWTONIANA	197
5.4.1 Introdução	197
5.4.2 O experimento de Michelson-Morley	197
5.4.3 A explicação de Lorentz e Fitzgerald	199
5.5 A RESOLUÇÃO DO CONFLITO ENTRE A MECÂNICA E O ELETROMAGNETISMO – A RELATIVIDADE ESPECIAL.....	204
5.6 O CONFLITO ENTRE A RELATIVIDADE ESPECIAL E A GRAVITAÇÃO NEWTONIANA – A EMERGÊNCIA DE UMA NOVA GRAVITAÇÃO	209
6 APRESENTAÇÃO DE UMA PROPOSTA DE AÇÃO DIDÁTICO-PEDAGÓGICA E OS PROCEDIMENTOS DE PESQUISA	223
6.1 INTRODUÇÃO	223
6.2 ASPECTOS GERAIS DA METODOLOGIA DA PESQUISA - OS INSTRUMENTOS PARA A COLETA DE DADOS	224
6.3 A DISCIPLINA EVOLUÇÃO DOS CONCEITOS DE FÍSICA NO CONTEXTO DA PESQUISA	225
6.4 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA TURMA.....	226
6.5 A ELABORAÇÃO E A IMPLEMENTAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA	227
7 SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS E ANÁLISE DA INTERVENÇÃO DIDÁTICA.....	247
7.1 ANÁLISE DA INTERVENÇÃO DIDÁTICA EM SUA PRIMEIRA FASE	247
7.1.1 Análise do desempenho dos alunos no primeiro questionário..	252
7.1.2 Considerações sobre a intervenção didática em sua primeira fase: avaliação do desempenho dos estudantes no questionário e análise dos dados advindos da primeira entrevista	290
7.2 ANÁLISE DA INTERVENÇÃO DIDÁTICA EM SUA SEGUNDA FASE	312
7.2.1 Análise do desempenho dos alunos no segundo questionário...	315
7.2.2 Considerações sobre a intervenção didática em sua segunda fase: avaliação do desempenho dos estudantes no questionário e análise dos dados advindos da segunda entrevista	351
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	375
REFERÊNCIAS	383

APRESENTAÇÃO

Nas últimas décadas, uma significativa parcela da comunidade de Educadores em Ciências vem, reiteradamente, defendendo o uso didático da história da ciência, como forma de promover entre os estudantes uma melhor compreensão da ciência, ao revelar as suas múltiplas dimensões: históricas, filosóficas, sociais e culturais. Aliada a essa expectativa existe também a compreensão de que ela pode desempenhar um relevante papel didático no processo de ensino-aprendizagem, contribuindo para uma melhor apreensão e operacionalização dos conceitos científicos (EL-HANNI, 2007; DUARTE, 2004; NARDI, 1994; GAGLIARDI, 1988).

Em sintonia com esses Educadores, os PCN e PCN+ sinalizam a necessidade de se articular ao ensino de ciências, na educação básica, elementos de história e filosofia da ciência. Contudo, como reconhecem seus próprios defensores, há uma série de obstáculos que se interpõe à sua adequada inserção na educação científica em nível básico (MARTINS, A. 2007; MARTINS, 2006; PEDUZZI, 2001).

O enfrentamento desses desafios na educação básica coloca para a comunidade de Educadores em Ciência a necessidade inadiável de articular a história da ciência à educação científica em nível superior, voltada para a formação de pesquisadores e professores. Havendo, pois, o reconhecimento de que uma adequada inserção da história da ciência nos cursos de graduação, principalmente na licenciatura, constitui-se no ponto de partida para que esta seja valorizada, compreendida e adequadamente inserida em outros níveis da educação científica.

No entanto, compreende-se também que essa “inserção adequada” não é uma tarefa trivial. A simples presença, na estrutura curricular, de uma disciplina ligada à história da ciência não garante que esta seja desenvolvida convenientemente, propiciando aos estudantes, ao menos, uma iniciação ao estudo do processo de produção e transformação das teorias e conceitos científicos, à luz da reflexão histórica e epistemológica contemporânea.

Além disso, faz-se necessário, promover entre os educandos uma apreensão desses conhecimentos históricos e epistemológicos, que lhes permitam pensar a ciência como um instrumento de compreensão e transformação da realidade. E, no âmbito da educação científica formal, como um instrumento de compreensão e transformação das práticas docentes e discentes tradicionais, assentadas no pressuposto de que o estudante é uma tabula rasa, o que reduz o trabalho docente à mera transmissão dos conteúdos científicos.

Nessa perspectiva, a reflexão empreendida neste trabalho busca compreender as potencialidades e limitações atinentes à inserção da história e filosofia da ciência, em uma disciplina voltada para História da Física, de um curso de Licenciatura em Física. O que permite suscitar as seguintes questões de pesquisa: Que tipo de história da ciência deve ser apresentado aos estudantes? Como a história da ciência deve ser apresentada? Uma proposta de ação didático-pedagógica, fundamentada nas reflexões contemporâneas da história e filosofia da ciência, pode contribuir para desenvolver, nos licenciandos, uma melhor compreensão da natureza da ciência e do processo histórico de construção das teorias e conceitos científicos, integrando esta compreensão à sua reflexão sobre o ensino de física? Que fatores, ligados ao contexto didático e à formação geral e científica do estudante, se interpõem à consecução desse objetivo?

Com este trabalho, de natureza reflexiva e propositiva, espera-se contribuir para que a história e a filosofia da ciência venham a ser, efetivamente, articuladas e valorizadas no ensino de física em nível superior, e, em especial, nos cursos de licenciatura. Um passo importante para que a história e a filosofia da ciência tenham o seu potencial pedagógico reconhecido, valorizado e explorado em outros níveis de ensino. O trabalho foi estruturado em sete capítulos que serão sucintamente apresentados a seguir.

O capítulo 1 – HISTÓRIA DA CIÊNCIA, EPISTEMOLOGIA KUHNIANA E ENSINO DE FÍSICA – inicia com a apresentação de uma visão geral do desenvolvimento da disciplina de História da Ciência no último século. A seguir, empreende-se uma reflexão sobre como a História da Ciência pode revelar, ao estudante e ao docente, uma imagem de ciência completamente distinta daquela tradicionalmente disseminada nos manuais de ensino. Advoga-se o uso da História da Ciência articulada a algumas das reflexões epistemológicas contemporâneas e são apresentados os principais conceitos da teoria kuhniana. O capítulo é encerrado com uma reflexão sobre as implicações pedagógicas da epistemologia histórica de Kuhn na educação científica.

O capítulo 2 – CONSIDERAÇÕES EDUCACIONAIS – apresenta no item 2.1 uma reflexão geral sobre a finalidade da educação superior e a formação de físicos. Partindo de uma acepção clássica do conceito de universidade e de alguns problemas do mundo contemporâneo, entre os quais a educação científica dialoga com alguns documentos oficiais ligados à Educação Superior (LDB/96), à Educação Básica (DCNEM, PCN, PCN+) e à formação de físicos (Diretrizes Curriculares Nacionais para os Cursos de Física). A análise desses documentos sugere que a

inserção da história e filosofia da ciência nos cursos de formação de físicos, principalmente nos cursos de licenciatura, deve ser encarada como uma necessidade educativa. No item 2.2 empreende-se uma reflexão geral sobre o desenvolvimento da ciência desde o Renascimento até as últimas décadas do século XX para, em face dos grandes desafios do mundo contemporâneo, defender a necessidade de uma aproximação entre a ciência e as humanidades. A história e a filosofia da ciência aparecem nesta reflexão como uma ponte entre a ciência e as humanidades, conforme sinalizou o historiador Herbert Butterfield em fins dos anos de 1940 (BUTERFIELD, 1992, p.9). No item 2.3 defende-se a história e a filosofia da ciência como instrumentos de reflexão e ação para a superação das práticas docentes tradicionais que, em geral, são designadas como “senso comum pedagógico” (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002). No tópico 2.4 o ensino tradicional de física é analisado à luz do referencial teórico da Transposição Didática. No item 2.5 busca-se uma aproximação com um referencial de educação progressista, inspirando-se nas reflexões do Educador Paulo Freire, no sentido de subsidiar uma ação didático-pedagógica que, valorizando o estudante como “sujeito do conhecimento”, procure estabelecer no espaço da sala de aula uma abordagem dialógica e problematizadora de tópicos da história e filosofia da ciência. A articulação das ideias de Freire ao Ensino de Ciências vem sendo desenvolvida por vários pesquisadores, com importantes contribuições teóricas e desdobramentos práticos (DELIZOICOV, 2008, 2001, 1991; GEHLEN, 2009; 2006).

No capítulo 3 – HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA NO ENSINO DE FÍSICA – Apresentam-se alguns dos argumentos favoráveis à utilização didática da história da ciência. Na seção 3.3 empreende-se uma reflexão sobre a simplificação e a deformação da história da ciência na educação científica, e, em especial, discute-se a possível (in)compatibilidade entre História da Física e Ensino de Física, tomando como foco as diferentes formas de deformação da história da ciência presentes no ensino (BALDINATO; PORTO 2007; PAGLIARINI, 2007; MARTINS, 2006). O item 3.4 analisa a ausência da história da ciência no ensino de física à luz do referencial teórico da Transposição Didática (CHEVALLARD, 2005; PINHO ALVES, 2000). A seguir, no item 3.5, apontam-se algumas das pesquisas que nos últimos anos tiveram como tema o desenvolvimento histórico da gravitação newtoniana.

O capítulo 4 – A GÊNESE DA GRAVITAÇÃO NEWTONIANA – Apresenta uma reconstrução histórico-filosófica do processo de produção e transformação das ideias científicas que, a partir da

emergência da teoria de Copérnico e sua implicação no desenvolvimento de uma nova física, atuaram em conjunção com outras transformações histórico-culturais para produzir as condições científicas, filosóficas e culturais que permitiram a Isaac Newton promover a ruptura epistemológica representada pela teoria da gravitação universal e sua articulação à nova ciência do movimento – a mecânica.

O capítulo 5 - AS LIMITAÇÕES DA GRAVITAÇÃO NEWTONIANA E A GÊNESE DA GRAVITAÇÃO EINSTEINIANA – Complementando a reflexão tecida no capítulo 4, traça uma visão geral do desenvolvimento histórico do eletromagnetismo e dos conflitos conceituais e epistemológicos que, contrapondo esta teoria à mecânica clássica, nortearam o trabalho de Einstein em direção à relatividade especial. O capítulo termina com uma reconstrução histórica do processo de resolução do conflito entre a relatividade especial e a gravitação newtoniana. Os esforços para a resolução deste conflito conduziram à emergência de um novo conceito de gravitação, com a formulação da teoria da relatividade geral.

O capítulo 6 – APRESENTAÇÃO DE UMA PROPOSTA DE AÇÃO DIDÁTICO-PEDAGÓGICA E OS PROCEDIMENTOS DE PESQUISA – Toma como referência os princípios educativos da dialogicidade e da problematização, presentes no pensamento pedagógico de Paulo Freire, que tem nos chamados “momentos pedagógicos” (DELIZOICOV, ANGOTTI; PERNAMBUCO 2002), uma das formas de instrumentalização no ensino de ciência. Com base nesses princípios, elaborou-se e implementou-se uma proposta de ação didático-pedagógica na disciplina Evolução dos Conceitos de Física, em um Curso de Licenciatura em Física. Este empreendimento foi materializado em uma sequência didática composta por duas unidades: a primeira abordando a revolução copernicana e a gênese da gravitação newtoniana; e a segunda contemplando as transformações nas teorias e conceitos científicos que permitiram a emergência da gravitação einsteiniana. Esta última, concebida com o propósito de explicitar para o estudante alguns dos problemas conceituais e limites apresentados pela mecânica e gravitação newtoniana, bem como as limitações da concepção empírico-indutivista, para a compreensão do processo de produção da relatividade especial e da nova gravitação apresentada na relatividade geral.

O capítulo 7 – SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS E ANÁLISE DA INTERVENÇÃO DIDÁTICA – Procura, a partir da análise dos dados empíricos, avaliar em que medida a intervenção didática, em cada uma das unidades implementadas, contribuiu para que os estudantes

desenvolvessem uma melhor reflexão crítica ou compreensão acerca dos aspectos relacionados à evolução dos conceitos físicos e à natureza da ciência, priorizados no trabalho de investigação, a saber: a interdependência entre observação e teoria, ou entre experimento e teoria; a historicidade da ciência (suas múltiplas dimensões: intrínseca, filosófica, cultural e histórica); o caráter provisório, mutável e inventivo do conhecimento científico (as teorias e conceitos científicos como produções do intelecto humano, balizadas pelo diálogo crítico e criativo com a natureza). A compreensão desses aspectos conceituais históricos e epistemológicos e sua articulação à reflexão do estudante sobre o uso da história da ciência no ensino de física, também foi objeto da análise da intervenção didática.

O capítulo 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS – Analisa a contribuição conjunta de ambas as fases da intervenção didática; confronta os dados empíricos obtidos nas duas etapas e faz uma avaliação das contribuições do trabalho para a formação do estudante. Finalizando, o pesquisador tece considerações sobre os limites interpostos à inserção da história da ciência, em um Curso de Licenciatura em Física, e ratifica a sua posição de que, apesar desses limites, a apresentação da história da ciência, em uma perspectiva contextualista, dialógica e problematizadora, é fundamental à formação docente, ao permitir a desnaturalização da tradição de um ensino de física dogmático e a-histórico, apontando novas possibilidades de se pensar o Curso de Licenciatura em Física.

1 HISTÓRIA DA CIÊNCIA, EPISTEMOLOGIA KUHNIANA E ENSINO DE FÍSICA

1.1 UMA VISÃO GERAL DO DESENVOLVIMENTO DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA NO ÚLTIMO SÉCULO

Ao longo do século XX a história da ciência passou por grandes transformações, deixando de ser uma mera crônica das grandes realizações científicas, ou instrumento ideológico de legitimação de uma nova forma de investigação da natureza - duas das formas pela quais ela vinha sendo intensamente utilizada desde o XVI - para lentamente institucionalizar-se como uma rigorosa disciplina de investigação do desenvolvimento das ideias científicas, desenvolvendo métodos próprios e assimilando importantes contribuições da História, da Sociologia e outras Ciências Sociais (ALFONSO-GOLDFARB, 2004).

É nas primeiras décadas do século XX que a história da ciência começa a dar os seus primeiros passos em direção a sua institucionalização acadêmica. Nesse período, a tendência historiográfica e epistemológica hegemônica era uma legítima herdeira da tradição historiográfica positivista desenvolvida em fins do século XIX.

George Sarton foi a principal liderança intelectual dessa corrente, desempenhando um papel proeminente na institucionalização da história da ciência. Foi o fundador e o editor, por muitos anos da revista *Isis*, participou da fundação da *History of Science Society* e de outras sociedades para a história da ciência em várias partes do mundo (DEBUS, 2004).

O modelo de história da ciência seguido por Sarton assentava-se nas concepções epistemológicas positivista da virada do século, abrangendo as ideias de estudiosos como E. Mach e Pierre Duhem, e tendo como pressuposto o desenvolvimento contínuo e acumulativo da ciência (ALFONSO-GOLDFARB; FERRAZ; BELTRAN, 2004). A visão historiográfica positivista de Sarton é muito criticada atualmente, contudo, há o reconhecimento de que ele deu uma grande contribuição ao desenvolvimento da área (MARTINS, 2001).

Nos anos 30 e 40, o modelo continuísta, baseado exclusivamente no desenvolvimento interno das teorias científicas, ainda permaneceria como paradigmático. Contudo, outras vertentes historiográficas iriam ganhar expressão. Uma dessas vertentes despontou no Segundo Congresso Internacional de História da Ciência e da Tecnologia, realizado em Londres em 1931.

Nesse congresso, a comunidade de historiadores da ciência do ocidente entrou em contato com a interpretação marxista da história da ciência, desenvolvida pelos historiadores soviéticos. Um destaque do evento foi o trabalho apresentado por Boris Hessen, *As raízes sociais e econômicas dos Princípios de Newton*, cujas análises assentavam-se no materialismo histórico.

O materialismo histórico, aplicado à história da ciência, vê a ciência como sendo produzida e determinada pelas relações sociais e econômicas em que a ciência ocorre. Assim, em vez de ver a ciência como uma atividade puramente intelectual, desenvolvendo-se de acordo com sua própria dinâmica conceitual interna, o materialismo histórico interpreta a ciência como uma forma de produção intelectual, ligada a preocupações econômicas, interesses, de classe e valores ideológicos de períodos históricos e culturas particulares (CHRISTIE apud MARTINS, 2001, p.23).

Nessa perspectiva externalista marxista, foram produzidos trabalhos como os de J. D Bernal (*Ciência na História*), no qual o autor tentava articular o desenvolvimento científico de cada época aos seus respectivos contextos - político, social, econômico e cultural, e a obra de Joseph Needham (*Science and Civilization in China*), que ainda hoje é considerado um marco na historiografia da ciência não eurocêntrica (MARTINS, 2001).

É importante salientar que a chamada corrente externalista da história da ciência não ficaria restrita apenas aos historiadores marxistas, ensejando o surgimento de outras vertentes, baseadas em outras matrizes teóricas. Nas abordagens externalistas, considera-se que a ciência e os cientistas não estão isentos das constrições sociais e políticas do contexto histórico em que atuam. Assim, para compreender a história do desenvolvimento científico é imprescindível investigar como os fatores sociais e políticos e econômicos atuaram sobre a ciência, em diferentes momentos históricos.

Uma abordagem externalista da história da ciência distinta da marxista surgiu no final da década de 1930, com os trabalhos do sociólogo Robert Merton que, norteado pelas concepções sociológicas de Max Weber, estudou as relações entre a ética protestante e a revolução científica do século XVII.

Merton encontrou uma forte correlação entre a filiação religiosa ao puritanismo e a importância científica de muitos participantes da revolução científica; e apontou uma grande semelhança entre os valores puritanos e os valores básicos da ciência experimental e voltada para a prática, adotados por esses pesquisadores (MARTINS, 2001, p.25).

O debate entre as correntes internalista e externalista foi importante para a História da Ciência, pois despertou o interesse por ideias e práticas extracientíficas que, de algum modo, podem ter integrado outras formas de investigação da natureza anteriores ao surgimento da ciência moderna (ALFONSO-GOLDFARB, 2004). Essas formas de conhecimento eram completamente ignoradas ou menosprezadas, na corrente liderada por Sarton, que simplesmente as classificava como “pseudociência” (DEBUS, 2004).

Assim, nesse período, cresce a importância de trabalhos que, mesmo sob a perspectiva internalista e continuísta, vinham analisando como outras formas de investigação da natureza como a magia e alquimia, “evoluíram” para a ciência experimental do século XVII (ALFONSO-GOLDFARB; FERRAZ; BELTRAN, 2004). Um exemplo dessa postura é o trabalho do historiador Lynn Thorndike, sobre a história da magia e da experimentação. Como salienta Martins:

[...] A relação inextricável entre magia, astrologia e ciência experimental nos séculos XVI e XVII começou a ser revelada pelos estudos de Lynn Thorndike e outros. Os trabalhos de Kepler e de Robert Boyle começaram a ser vistos sob uma nova luz, quando seus aspectos religiosos e místicos deixaram de ser “expurgados” pelos historiadores da ciência (MARTINS, 2001, p. 27).

No início dos anos 30 começam a surgir críticas à perspectiva positivista e continuísta da história da ciência, com os trabalhos: As bases metafísicas da ciência moderna, de Edwin Burt (BURT, 1983) e O novo espírito científico de Gaston Bachelard (BACHELARD, 2000).

Após a II Guerra Mundial ganha destaque uma série de estudos que, cada vez mais, evidenciam as limitações da visão acumulativa do desenvolvimento científico. Exerce grande influência sobre os historiadores da ciência do período os escritos de Alexandre Koyré, que

estabelecem uma linha de história intelectual da ciência, ampliando em muito a análise da história da ciência, ao estudar as influências culturais mais amplas como a filosofia e a religião.

Koyré conseguiu evidenciar que a ciência moderna não foi pensada apenas pelos “grandes gênios”, mas que vários pensadores relativamente desconhecidos também se debruçaram sobre alguns dos problemas resolvidos pelos cientistas famosos.

[...] Através de uma análise crítica e detalhada de alguns textos emblemáticos da revolução científica, Koyré foi capaz de mostrar que os “grandes cientistas” não eram tão infalíveis quanto se pensava, e não utilizavam de modo sistemático o próprio método experimental que apregoavam. [...] Por outro lado, estudando trabalhos de alguns “desconhecidos” e comparando-os com os dos “famosos”, mostrou que a capacidade de produzir trabalhos com valor científico estava distribuída pela humanidade de um modo muito mais democrático do que se pensava antes (MARTINS, 2001, p.26).

O período entre a II Guerra e a década de 1960 é considerado um período de transição, em que importantes estudos históricos, cada vez mais, se distanciam da abordagem positivista e exclusivamente internalista, predominante nas três primeiras décadas. Os novos estudos empreendidos por historiadores como: Rupert Hall, Clagett, Crombie, Gillispipe e Koyré, são classificados como “internalistas”, por não levarem em conta a influência dos fatores sociais, políticos e econômicos sobre o desenvolvimento das ideias científicas (MARTINS, 2001). Contudo, convém salientar que o “internalismo” dessa geração é conceitualmente mais complexo e rico do que o da maior parte dos seus antecessores. Esses novos historiadores estão interessados na história intelectual da ciência. Dessa forma procuram investigar a influência das ideias advindas do contexto cultural mais amplo (filosofia, religião, astrologia, magia), sobre as ideias científicas. Novos temas e enfoques são incorporados ao trabalho desses estudiosos. Simultaneamente, importantes linhas de estudo abertas ainda no período anterior, e por historiadores positivistas, como os estudos sobre a ciência na Idade Média de Pierre Duhem e os estudos sobre a magia e alquimia e ciência experimental de Lynn Thorndike, são revalorizados e aprofundados à

luz das novas concepções, historiográficas e epistemológicas (ALFONSO-GOLDFARB, 2004; MARTINS, 2001).

Na década de 1960, a História da Ciência passou por grandes transformações, abrindo-se para um processo de interação mais intenso, complexo, rico e controverso com filósofos e sociólogos da ciência. Um marco dessas mudanças foi a publicação, em 1962, do livro “A estrutura das revoluções científicas”, de Thomas Kuhn (KUHN, 1996).

Nessa obra, inspirado pela leitura de autores como, Alexandre Koyré, Emile Meyerson, Ludwig Fleck e Jean Piaget, entre outros, Kuhn empreende uma ousada e original interpretação da história da ciência. Emerge assim, uma nova visão de ciência, com uma crítica radical às teses epistemológicas do positivismo lógico e a concepção historiográfica continuísta e acumulativa.

Em linhas gerais, a epistemologia histórica de Kuhn procurou destacar os seguintes aspectos: a não neutralidade das observações científicas, uma vez que as observações são precedidas de teorias; a falta de justificativa lógica para o “método indutivo”; e o reconhecimento do caráter construtivo, criativo e provisório do conhecimento científico. Além disso, as suas reflexões evidenciaram que as disputas entre teorias científicas, em geral, não são resolvidas apenas por critérios restritos à racionalidade científica. Valores de natureza filosófica, estética, política e econômica, compõem, implícita ou explicitamente, os argumentos que emergem quando os membros de uma comunidade científica entram em litígio em defesa de uma teoria.

Assim, sem negar a validade dos argumentos científicos, pois os cientistas dialogam com a natureza, que, de certa forma, impõe limites às suas especulações, Kuhn, em suas análises, evidenciou a necessidade de se recorrer à sociologia interna da ciência, a fim de se compreender a dinâmica da comunidade científica, assim como à história e às ciências sociais, no sentido de compreender como fatores ligados à dinâmica da sociedade podem ter atuado sobre a ciência. Em síntese, a análise kuhniana propiciou elementos para um esforço de articulação entre as abordagens internalistas e externalistas.

A obra de Kuhn suscitou um intenso debate entre historiadores, filósofos e sociólogos da ciência. Posteriormente, filósofos da ciência como Lakatos e Feyerabend apresentariam suas epistemologias históricas, nas quais se podem perceber aproximações, bem como pontos de completa divergência em relação à epistemologia de Kuhn. É interessante observar que, não obstante a originalidade das reflexões de Kuhn, já na década de 30 pensadores como Popper (POPPER, 1975) e

Bachelard (BACHELARD, 2000, 1996) fizeram contundentes críticas à visão positivista da ciência.

No âmbito da sociologia da ciência, a análise kuhniana estimulou ainda a emergência de uma gama de estudos sobre diferenças entre grupos de pesquisa, “estilos cognitivos” e a dinâmica de grupos científicos. Desenvolveram-se estudos sobre o “sistema social da ciência”, abarcando temas como, o desenvolvimento das instituições científicas, a instituição de novas disciplinas, estruturas de carreiras, sistemas de premiação e normas científicas, etc. Nesse contexto, ganham relevo os estudos quantitativos sobre o desenvolvimento da ciência, empreendidos por Derek de Solla Price, assim com os trabalhos de Robert Merton (MARTINS 2001).

A partir da década de 1970, a abordagem sociológica da ciência e da história da ciência sofreu uma acentuada mutação, passando a desenvolver uma crítica radical à racionalidade da ciência. Essa viragem sociológica em parte se inspirou no sucesso da obra de Kuhn, que ao analisar a formação, defesa e declínio de paradigmas científicos, deu relevo à atuação das forças sociais, no processo das ideias aceitas pela comunidade científica (MARTINS, 2001). Mas por outro lado, havia também um contexto geopolítico (a guerra fria) e sociocultural (a crítica aos valores tradicionais da sociedade ocidental), que favorecia, pelo menos no hemisfério norte, a crítica à objetividade e neutralidade do conhecimento científico, visto por muitos como indissociavelmente ligados à indústria da guerra e de destruição do planeta (GRECA; FREIRE JÚNIOR, 2004).

Surgem assim os “*science studies*”, posteriormente denominados “estudos sociais da ciência”. Essa abordagem adotou uma posição epistemológica relativista forte, passando a questionar o valor científico intrínseco das teorias e descobertas científicas.

A análise sociológica da ciência derrubou a visão de uma ciência “neutra”, desprovida de valores, e mostrou a onipresença de mensagens carregadas de valores nos textos científicos. Também mostrou que as decisões tomadas pelos cientistas quanto ao próprio conteúdo da ciência são negociadas pela mediação de interesses não epistêmicos. As intenções, os desejos, os motivos dos cientistas foram analisados nessas últimas décadas de forma impiedosa pelos sociólogos da ciência que adotam o “programa forte”, que exclui as considerações epistemológicas das descrições

relativas à aceitação e rejeição de propostas científicas (MARTINS, 2001, p.30).

Nas últimas décadas do século XX emergem novas vertentes de estudos sociais da ciência, tais como: uma nova visão marxista, representada por Robert Young; a análise crítica do discurso científico, empreendida por Michel Foucault, que nega a objetividade científica e advoga uma visão de ciência descontinuista e relativista, e os estudos de Bruno Latour e Steve Woolgar, que pretendem evidenciar a “construção social do conhecimento”.

Além das abordagens sociológicas, outras abordagens da história da ciência ganharam maior evidência ao final do século XX, passando a valorizar novos temas, personagens históricos e formas de conhecer e dialogar com a natureza. Como exemplo dessa tendência pode-se indicar: o estudo de temas e personagens que ficaram à margem da corrente principal da ciência “vencedora”; estudos sobre a ciência recente atual; estudos etnográficos do trabalho científico, abrangendo formas de ciência não eurocêntricas, como a africana, a pré-colombiana e islâmica; estudos etnológicos de temas científicos, (etnoastronomia, etnomatemática, etnobiologia); e estudos sobre a relação entre ciência e algumas questões sociais, controversas, tais como ciência e gênero, ciência e raça, ciência e minorias (MARTINS, 2000).

1.2 IMAGEM DE CIÊNCIA E HISTÓRIA DA CIÊNCIA

Ao se confrontar a imagem de ciência disseminada pela educação científica tradicional, em seus distintos níveis de ensino, com aquela que emerge do exame da história da ciência, à luz das reflexões dos historiadores e filósofos da ciência contemporâneos, evidencia-se que essas imagens são bem distintas. A ciência, a despeito de sua especificidade e da notável funcionalidade de seus argumentos e teorias explicativas, da natureza, é uma construção intelectual humana, com espaço para a ambiguidade e a incerteza; tem uma historicidade, sendo, portanto, dinâmica e mutável ao longo do tempo.

O papel da história da ciência como fonte de uma imagem de ciência diversa daquela que tem sido disseminada pela educação científica é assinalado por Kuhn:

Se a História fosse vista como um repositório para algo mais do que anedotas ou cronologias, poderia produzir uma transformação decisiva na imagem

de ciência que atualmente nos domina. Mesmo os próprios cientistas têm haurido essa imagem principalmente no estudo das realizações científicas acabadas, tal como estão registradas nos clássicos e, mais recentemente, nos manuais que cada nova geração utiliza para aprender seu ofício (KUHN, 1996. p.19).

Contudo, deve-se observar que de uma forma, ou de outra, a educação científica tradicional tem feito uso da história da ciência, mesmo quando essa “história”, em um aparente paradoxo, conduz a uma visão a-histórica da ciência. Assim, torna-se pertinente explicitar a clássica e recorrente questão: O que é história da ciência?

Essa questão não comporta uma resposta única. Há entre os historiadores e filósofos da ciência várias concepções de história da ciência, algumas delas, talvez, incompatíveis com as necessidades da educação científica contemporânea. Entre os pesquisadores em ensino de ciências, também é possível afirmar que há várias visões de “história da ciência”, e, consequentemente, diferentes formas de conceber o seu uso no ensino de ciências.

Se a história da ciência apresenta distintas visões, então é cabível a pergunta: que tipo de história da ciência deve ser articulado ao ensino de física? A resposta a esta questão, como se sabe, também não é única. No entanto, o campo das possíveis respostas é limitado pelo perfil de professor, cientista e cidadão que se deseja formar.

Em meio a uma ampla variedade de concepções, com muitas controvérsias e questões em aberto, é possível, contudo, encontrar posições de relativo consenso acerca da dimensão epistemológica do processo histórico de produção do conhecimento. Há nas reflexões de pensadores como Kuhn, Popper, Lakatos, Feyerabend e Bachelard, entre outros, uma forte oposição à concepção de ciência empírico-indutivista (OSTERMANN, 1996; GIL et al. 2001).

Neste trabalho defende-se uma visão de história da ciência que não se limite à mera descrição cronológica, anedótica e acrítica dos episódios e cientistas do passado. Compreende-se que o esforço intelectual empreendido na tentativa de se entender a Física do passado – levando-se em conta as inquietações e dúvidas de seus principais protagonistas, os avanços e recuos das ideias explicativas sobre a natureza, as disputas e controvérsias científicas, os incentivos e restrições do contexto sócio-histórico – pode ser útil para uma melhor compreensão da Física do presente (MARTINS, 2006).

Valoriza-se aqui uma concepção de história da ciência que ofereça aos futuros professores e cientistas a oportunidade impar de, a partir de formulações teóricas do presente, dialogar criticamente com o contexto científico cultural do passado. Assim, espera-se contribuir para que o estudante desenvolva uma visão da Física e da Ciência em geral, como uma componente indissociável da construção do mundo moderno, tanto em seus aspectos positivos, quanto nefastos (ZANETIC, 1989; PIETROCOLA, 2001). Portanto, se a lógica interna da ciência é imprescindível para entender o seu discurso, sua vinculação ao contexto histórico revela a sua dimensão humana, inclusive a relação do discurso científico com outras formas de discurso, inclusive aqueles produzidos no âmbito das humanidades.

A ciência é uma atividade intelectual criadora que é influenciada por ideias, demandas e injunções do contexto sócio-histórico, no qual vivem e trabalham os cientistas. Contudo, esta influência de nenhuma forma é absorvida de forma passiva, assim como a ciência é influenciada ela também influencia esse contexto sócio-histórico (MARTINS, 2006; SANTOS; CALUZI, 2005).

A análise epistemológica dos fatores internos e externos à ciência que em dado período histórico favoreceram ou dificultaram a gênese dos principais conceitos e teorias científicas, bem como as suas subsequentes retificações e transformações, até as formas aceitas atualmente, apresenta um grande potencial educativo. Uma efetiva exploração da dimensão epistemológica do processo de produção do conhecimento científico pode contribuir, sobremaneira, para que os estudantes adquiram uma visão mais adequada da ciência e do trabalho científico, além de proporcionar um refinamento intelectual da compreensão desses conceitos e teorias (MARTINS, 2006; GIL et al. 2001).

No esforço de articulação da história e filosofia da ciência à formação de professores e cientistas é importante a opção preferencial por matrizes epistemológicas em que as múltiplas contradições, avanços, retrocessos e descontinuidades, constitutivas dessa história sejam reveladas, discutidas e valorizadas. Advoga-se aqui o uso de uma epistemologia centrada na história. Uma epistemologia histórica que, embora reconheça o alcance e a relativa autonomia dos métodos e modelos desenvolvidos pela ciência, de nenhuma forma considera irrelevante a influência das concepções filosóficas, religiosas e estéticas, sobre as ideias científicas; o papel dessas convicções como alimento espiritual dos cientistas em seus esforços de interpretação da natureza (KUHN, 1996).

Nesta perspectiva, compreende-se que um diálogo com a epistemologia kuhniana, levando-se em conta as críticas de outros pensadores, bem como algumas aproximações com outros referenciais epistemológicos, será profícuo no desenvolvimento deste trabalho de articulação da história e filosofia da ciência ao ensino de física.

1.3 O DESENVOLVIMENTO DA CIÊNCIA SOB A PERSPECTIVA KUHNIANA

Em linhas gerais, a perspectiva kuhniana concebe o desenvolvimento da ciência como uma sucessão de períodos de ciência normal, em que o desenvolvimento é cumulativo, intercalados por períodos de crise-revolução. Nesses períodos, os repetidos esforços de se ajustar os fatos à teoria vigente, ou de se refiná-la, de forma a assimilar os fatos, revelam-se infrutíferos. A busca de uma solução acaba por promover mudanças conceituais tão profundas que assinalam uma ruptura com a antiga teoria, configurando a chamada revolução científica (KUHN, 1996).

A “ciência normal” é compreendida por Kuhn como:

[...] a pesquisa firmemente baseada em uma ou mais realizações científicas passadas. Essas realizações são reconhecidas durante algum tempo por alguma comunidade científica específica como proporcionando os fundamentos para a sua prática posterior (KUHN, 1996, p. 29).

Esses empreendimentos, que durante algum tempo definem o campo de pesquisa e orientam a investigação científica, são chamados de paradigmas. De acordo com Kuhn, os períodos de ciência normal são caracterizados por uma profunda adesão da comunidade científica a um paradigma - conjunto de definições, conceitos, leis, modelos, teorias, instrumentais, valores, etc, compartilhados pelos praticantes de uma determinada comunidade científica¹.

O paradigma é uma conquista das ciências maduras, que antes da aquisição de seu primeiro paradigma passam por uma fase pré-paradigmática, que pode ser chamada de pré-ciência. O período pré-paradigmático, ou pré-ciência, caracteriza-se por um intenso conflito entre pesquisadores individuais, ou grupos de pesquisadores, que ao se

¹ Na obra A estrutura das revoluções científicas (KUNH, 1996) o termo paradigma possui várias acepções, contudo, para os objetivos do presente trabalho, a definição apresentada é suficiente.

confrontarem com a mesma classe de fenômenos dão a eles explicações distintas, em decorrência de adotarem pressupostos teóricos incompatíveis entre si (PEDUZZI, 2006).

Sobre a prática científica em um período pré-paradigmático, Kuhn afirma:

Na ausência de um paradigma ou de algum candidato a paradigma, todos os fatos que possivelmente são pertinentes ao desenvolvimento de determinada ciência têm a probabilidade de parecerem igualmente relevantes. Como consequência disso, as primeiras coletas de fatos se aproximam muito mais de uma atividade ao acaso do que daquelas que o desenvolvimento da ciência torna familiar (KUHN, 1996, p. 35).

Como exemplo de ciência sem paradigma Kuhn aponta a óptica física antes de Newton, o estudo do calor antes de Black e Lavoisier, e as pesquisas elétricas na primeira metade do século XVIII, antes dos trabalhos de Franklin (KUHN, 1979a).

Para que um dado conjunto de definições, conceitos, leis, valores, procedimentos, etc., ascenda à condição de paradigma ele deve atender a duas características básicas: suas realizações devem ser “suficientemente sem precedentes” para atrair um grupo duradouro de adeptos; e ao mesmo tempo, suficientemente abertas de forma a deixar uma gama de problemas que devem ser resolvidos pelos seus seguidores (KUHN, 1996).

Entre as realizações científicas que apresentam essas características estão: A Física de Aristóteles, o *Almagesto* de Ptolomeu, os *Principia* e a *Óptica* de Newton, a Eletricidade de Franklin e a Química de Lavoisier. Esses trabalhos, durante algum tempo, definiram, implícita ou explicitamente, os problemas e métodos de investigação para sucessivas gerações de praticantes de uma ciência.

Kuhn identifica a ciência normal como uma atividade demasiadamente conservadora, marcada por uma adesão incondicional, dogmática, a um paradigma. Esta rigidez da ciência normal é considerada como necessária e fundamental ao desenvolvimento científico (ZYLBERSZTAJN, 1991; OSTERMANN, 1996). Assim, na perspectiva kuhniana, é no período de ciência normal que os cientistas exploram as possibilidades do paradigma.

Como exemplos de ciência normal, Kuhn (1979) aponta: a astronomia durante a Idade Média, com o paradigma ptolomaico; a mecânica nos séculos XVIII e XIX com o paradigma newtoniano; a Teoria da Relatividade no século XX com o paradigma relativístico.

Contudo, um paradigma quando surge é “em grande parte uma promessa que pode ser descoberta em exemplos selecionados e ainda incompletos” (KUHN, 1996, p. 44). Cabe à ciência normal atualizar essa promessa. Por exemplo, a teoria de Copérnico foi consideravelmente refinada e ampliada pelos trabalhos de Kepler; os físicos matemáticos do século XVIII e XIX clarificaram os conceitos, definições e demonstrações, contidos nos *Principia*, conferindo-lhe uma maior funcionalidade.

Em linhas gerais, essa tarefa é desenvolvida com o enfrentamento de três tipos de problemas: (a) ampliação do conhecimento sobre os fatos que, sob a ótica do paradigma, são relevantes – os fatos significativos; (b) aumento da correlação entre os fatos e as previsões da teoria do paradigma; (c) e articulação da teoria do paradigma (KUHN, 1996).

A adoção de um paradigma e o uso dos fatos significativos na resolução de problemas exige que esses fatos tenham determinação mais precisa. Como exemplos de problemas dessa classe podem ser indicados: na Astronomia - a posição e a magnitude das estrelas, os períodos dos eclipses das estrelas duplas e dos planetas; na Física - as gravidades e as compressibilidades específicas dos materiais, comprimentos de ondas e intensidades espectrais; na Química - os pesos de composição e combinação, pontos de ebulição e acidez das soluções, as fórmulas estruturais e as atividades óticas. O projeto de equipamentos como os aceleradores de partículas e os radiotelescópios, são também demonstrações inequívocas da confiança que os cientistas depositam em um paradigma, se este lhes assegura a relevância dos fatos que pesquisam (KUHN, 1996).

As atividades relacionadas aos problemas do 2º tipo consistem na dupla tarefa de ajustar a teoria do paradigma, de forma a levá-la a previsões que possam ser confrontadas diretamente com a experiência, e no desenvolvimento de equipamentos para a verificação de previsões teóricas. Configuram-se como atividades desse tipo: a construção da máquina de Atwood, feita quase um século após os *Principia* para fornecer a primeira demonstração da segunda Lei de Newton (KUHN, 1996). Em tempos mais recentes, o desenvolvimento de aceleradores de partículas levou à detecção do “quark-top”, partícula subatômica prevista teoricamente pelo Modelo Padrão (OSTERMANN, 1996).

Enquadra-se também nesta categoria a detecção do méson π , feita nos anos 40 pelo pesquisador César Lattes. Sem a existência de um paradigma norteante essas medidas careceriam de significado, talvez sequer fossem planejadas e executadas.

A classe de problemas relacionados à articulação da teoria do paradigma é considerada por Kuhn como a mais importante. Aqui aparecem os trabalhos desenvolvidos que permitiram a resolução de algumas ambiguidades presentes na teoria do paradigma, levando à solução de problemas para os quais essa teoria, anteriormente, havia apenas chamado a atenção. Podem ser apontadas como atividades desse tipo: a determinação da constante de gravitação universal (G) por Henry Cavendish e a determinação da Lei de Coulomb. Enquadra-se ainda nesta classe de problemas, àqueles relacionados ao refinamento da teoria do paradigma, com o objetivo de adaptá-la às novas áreas de investigação. Como exemplos desse tipo de atividade podem ser apontados os trabalhos de Euler, Laplace e Gauss, bem como os de Lagrange, que conduziram à Mecânica Analítica (KUHN, 1996).

A ciência normal, em seu constante e contínuo esforço de adaptar a natureza ao paradigma e vice-versa, acaba por fazer emergir problemas teóricos e experimentais relevantes, que se mostram insolúveis mesmo quando abordado por cientistas de reconhecida competência e prestígio. Entre os problemas resistentes à solução alguns podem advir de descobertas ou invenções (PEDUZZI, 2006).

Diante de um cenário conceitual em que “as ideias não correspondem aos fatos”, e os fatos não se “ajustam às ideias”, instala-se no seio da comunidade científica o “fantasma” da crise. Os problemas não são mais encarados como quebra-cabeças cuja solução dependerá apenas do talento e da persistência dos pesquisadores; agora, eles passam a ser considerados como “anomalias” (ZYLBERSZTAJN, 1991; OSTERMANN, 1996).

A resolução da crise dentro dos cânones conceituais estabelecidos revitaliza a confiança no paradigma. Em contrapartida, a sua persistência e mesmo crescimento, com o surgimento de novas situações não resolvíveis, leva muito membros da comunidade científica ao reexame crítico das leis e conceitos fundamentais do paradigma (PEDUZZI, 2006). Como salienta Kuhn:

Ao reconhecer que algo está fundamentalmente errado na teoria com que trabalham, os cientistas tentarão articulações da teoria mais fundamentais do que as que eram admitidas antes. (É típico, nos

tempos de crise encontrar numerosas versões diferentes da teoria do paradigma) (KUHN, 1979a, p.76).

A persistência da crise também sinaliza para muitos cientistas a necessidade de se construir novas teorias, de se buscar novos rumos para a investigação científica. Em consequência desse esforço surge um paradigma rival com a capacidade de resolver os mesmos problemas fundamentais que o paradigma dominante, apresentar solução para as suas anomalias e fazer previsões passíveis de teste. A adoção do novo paradigma pela comunidade científica, em substituição ao antigo, caracteriza, em termos kuhnianos, uma “revolução científica” (PEDUZZI, 2006).

Na perspectiva kuhniana revoluções científicas são: “aqueles episódios de desenvolvimento não cumulativo, nos quais um paradigma antigo é total ou parcialmente substituído por um novo, incompatível com o anterior” (KUHN, 1996, p. 125).

Uma vez consolidada a mudança de paradigma, se estabelece uma nova tradição de ciência normal, com as características de trabalho que lhe são inerentes. Contudo, uma revolução científica está longe de ser um processo cumulativo obtido a partir de uma articulação do velho paradigma. Uma revolução científica pode ser pensada como uma redefinição da área de estudos a partir de novos princípios, o que acarreta mudanças em algumas das generalizações do paradigma, assim como em muitos de seus métodos e aplicações (OSTERMANN, 1996).

Na epistemologia kuhniana os proponentes de paradigmas em competição são concebidos como praticando os seus ofícios em mundos distintos. É neste sentido que Kuhn usa a expressão incomensurabilidade de paradigmas. A ideia de incomensurabilidade está associada ao fato de que os padrões científicos são diferentes para cada paradigma. Como exemplo de paradigmas incomensuráveis Kuhn aponta os paradigmas newtoniano e relativístico. Nesses paradigmas, conceitos como massa, energia e tempo não podem ser considerados como idênticos, pois apresentam distintos significados (KHUN, 1996).

No posfácio da edição de 1969 de “A estrutura das revoluções científicas”, Kuhn suaviza a incomensurabilidade entre paradigmas, ao propor a possibilidade de recíproca tradução entre os pesquisadores ligados a diferentes paradigmas em competição.

Em decorrência do processo de tradução é possível aos pesquisadores de ambos os paradigmas aferir os méritos e defeitos recíprocos. Contudo, a conversão ao novo paradigma só ocorrerá se o

partidário do velho paradigma acreditar na promessa do novo. Assim, a incomensurabilidade inicial proposta por Kuhn transforma-se agora em incompatibilidade, em função da possibilidade de tradução e consequentemente de mudança paradigmática (PEDUZZI, 2006).

1.3.1 Críticas à epistemologia de Kuhn

A primeira edição de “A Estrutura das Revoluções Científicas” publicada em 1962, teve uma grande repercussão nos círculos intelectuais dos pensadores, de distintas formações - filósofos, historiadores, sociólogos e cientistas – interessados na investigação de uma das atividades mais singulares e, ao mesmo tempo, mais representativas do mundo contemporâneo – a ciência.

A obra de Kuhn, através de um criativo diálogo com a história da ciência, evidenciou que a comunidade científica no processo de escolha das teorias científicas faz uso, não apenas dos critérios lógicos, e da necessária concordância da teoria com os dados experimentais. Apesar do grande peso desses critérios, Kuhn deu um grande relevo ao papel desempenhado pelos pressupostos e valores filosóficos, religiosos e estéticos dos cientistas, na própria definição do que deveria ser considerado científico em diferentes momentos históricos (KUHN, 1996).

Tal enfoque da empresa científica conferia à ciência, e seus critérios de julgamento das teorias e experimentos, elementos de arbitrariedade e subjetividade impensáveis e inadmissíveis para aqueles que concebiam o conhecimento científico como, unicamente, subordinado à racionalidade lógica e à inexorável neutralidade dos fatos e dados experimentais. Anuncia-se assim, uma ruptura com a visão historiográfica tradicional que estava em sintonia com as teses epistemológicas do positivismo lógico.

As críticas à visão cumulativa da história da ciência e à epistemologia empírico-indutiva, reelaboradas pelo Círculo de Viena, já vinham sendo feitas desde os anos 30, quando surgiram os trabalhos de Bachelard e Popper (BACHELARD, 2000; POPPER, 1975). Contudo, deve-se salientar que, apesar desses trabalhos já conterem contundentes refutações ao positivismo, até os anos de 1960 eles ainda não haviam recebido a devida atenção do mundo acadêmico (CHALMERS, 1993). Esses fatores, aliados à própria originalidade da obra de Kuhn, contribuíram para amplificar a repercussão de suas ideias, conferindo-lhe o caráter de divisor de águas no campo da história e filosofia da ciência (FEYERABEND, 2007).

No Colóquio Internacional sobre Filosofia da Ciência, realizado em Londres em 1965, a Estrutura foi amplamente debatida por alguns dos mais importantes filósofos da ciência contemporâneos como: Karl R. Popper, Imre Lakatos e Paul K. Feyerabend, entre outros. Nesse debate, além de pontos de sintonia com as ideias de Kuhn, surgiram também significativas críticas, que o obrigaram a rever ou clarificar alguns de seus argumentos. Algumas dessas críticas são explicitadas a seguir.

Popper (1979) considera que, para a ciência praticada em alto nível, a distinção entre ciência normal e revolucionária não é tão nítida quanto leva a crer a análise de Kuhn. Para ele a ciência é uma atividade permanentemente revolucionária, marcada pela busca constante do falseamento e substituição de teoria. Assim, não aceita a categoria kuhniana de “ciência normal”, para a pesquisa efetivamente criativa. Antes, reserva este termo para a pesquisa de menor expressão, compreendida pelo “baixo clero” da comunidade científica.

A ciência “normal”, no sentido de Kuhn, existe. É a atividade do profissional não-revolucionário, ou melhor, não muito crítico: do estudioso da ciência que aceita o dogma dominante do dia; que não deseja contestá-lo; e que só aceita uma nova teoria revolucionária quando quase toda a gente está pronta para aceitá-la – quando ela passa a estar na moda, como uma candidatura antecipadamente vitoriosa a que todos, ou quase todos, aderem. Resistir a uma nova moda exige tanta coragem quanto criar uma (POPPER, 1979, p.64).

Na análise do problema de escolha de teorias, Popper reafirma a sua convicção de que os cientistas coletivamente, a despeito de suas preferências individuais, sempre são capazes de estabelecer critérios racionais e objetivos para a escolha entre duas teorias rivais, ainda que esses critérios sejam provisórios (SILVEIRA, 1996a).

Em sintonia com Popper, Lakatos (1979) critica a tese da incomensurabilidade entre teorias rivais. E sustenta a existência de critérios objetivos de ordem racional, que embora a comunidade científica não possa aplicar no auge da competição, são aplicáveis a posteriori. Esses critérios permitem aferir a superioridade da teoria vencedora (VILLANI, 2001).

Coerente com a sua defesa do primado da racionalidade no desenvolvimento científico Lakatos ataca duramente a ideia kuhniana de crise:

Na concepção de Kuhn, por exemplo, as anomalias e incoerências sempre abundam na ciência, mas em geral em períodos “normais” o paradigma dominante assegura um padrão de crescimento finalmente derrubado por uma “crise”. Não existe nenhuma causa racional determinada para o aparecimento de uma “crise” kuhniana. “Crise” é um conceito psicológico; é um pânico contagioso (LAKATOS, 1979, p.220).

Neste mesmo espírito, critica a “irracionalidade” da revolução científica kuhniana, “uma questão da psicologia das multidões” (LAKATOS, 1979, p.221). Em termos lakatosianos, a revolução científica consiste em um processo racional de substituição de um programa de pesquisa por outro. Esta substituição ocorre quando um programa apresenta um excesso de conteúdo de verdade em relação ao seu antagonista, ou seja, é capaz de realizar as previsões deste e mais algumas que lhe são inacessíveis (SILVEIRA, 1996b).

Feyerabend critica a forma ambígua como Kuhn expõe as suas ideias sobre o desenvolvimento da ciência. Afinal, Kuhn descreve ou prescreve como deve ser a ciência normal? Considera esta ambiguidade intencional, cumprindo um importante papel persuasivo na estratégia de legitimação da visão kuhniana de ciência.

Aventuro-me a conjecturar que a ambiguidade é pretendida e que Kuhn deseja explorar plenamente suas potencialidades propagandísticas. Deseja, de um lado, dar um apoio sólido, objetivo e histórico a julgamentos de valor que ele, como muitas outras pessoas, parece considerar arbitrários e subjetivos. Por outro lado, deseja deixar para si mesmo uma segunda linha segura de retirada: os que desgostam da derivação implícita de valores a partir de fatos sempre poderão ouvir dizer que essa derivação não se faz e que a apresentação é puramente descritiva (FEYERABEND, 1979, p. 246,247).

Para Feyerabend, a mudança da pré-ciência para a ciência não pode ser vista como a substituição do intenso debate e proliferação de teoria da primeira, pela adesão irrestrita a uma teoria dominante e a tradição de solução de quebra-cabeças de uma ciência normal. Em sintonia com o modelo de Lakatos, sugere que, “a relação correta é uma relação de *simultaneidade e interação*” (FEYERABEND, 1979, p. 263). Postula então que, em ambos os períodos – normal e revolucionário – podem interagir o que ele designa como: “*componente normal*” e “*componente filosófico*” da atividade científica.

Um outro aspecto da crítica feyerabendiana que cabe destacar reside em sua rejeição aos “traços dogmáticos, autoritários e tacanhos da ciência normal”, que lhe conferem um caráter monolítico. Para Feyerabend este tipo de ciência, cerceia, mesmo que temporariamente, a criatividade científica do cientista, além de descaracterizá-lo como um explorador do desconhecido, reduzindo à sua atividade a “luta para articular e concretizar o conhecido” (FEYERABEND, 1979, p. 255).

1.3.2 Aproximações com a epistemologia de Kuhn

O debate em torno da obra de Kuhn evidenciou não apenas divergências em relação à sua visão de ciência. Apesar das duras críticas a Kuhn e das divergências dos debatedores ente si, quanto aos diferentes aspectos da epistemologia kuhniana, é possível identificar pontos de consenso entre os quatro pensadores em pauta, assim como algumas aproximações entre as suas respectivas visões de ciência e a traçada por Kuhn.

Uma característica comum às distintas abordagens epistemológicas da Ciência empreendidas por Kuhn, Popper, Lakatos e Feyerabend é a perspectiva antiempirista. Para esses pensadores o desenvolvimento da ciência não pode ser fundamentalmente explicado através da cuidadosa obtenção de dados experimentais, seguida da elaboração de teorias mais abrangentes, como sustentavam os positivistas (VILLANI, 2001). Compreendem que no processo de produção do conhecimento, a primazia da relação sujeito-objeto não está, nem com o segundo, como sustenta a concepção empirista, nem com o primeiro, como entende a concepção idealista. Assim, superando ambas as abordagens compartilham o pressuposto de que a ocorrência do conhecimento advém da interação não neutra entre sujeito-objeto (DELIZOICOV, 1996).

Nessa perspectiva, pode-se assinalar alguns pontos de convergência entre essas distintas matrizes epistemológicas

(FEYERABEND, 2007; KUHN, 1996; POPPER, 1975; LAKATOS, 1979). Por exemplo, a compreensão de que:

- Fatos e teorias estão inextricavelmente ligados, tendo em vista que toda a observação, e/ou experimentação, está carregada de teoria. Dessa forma, observação e experimentação, isoladamente, não produzem conhecimento, sendo o método indutivo uma quimera.
Os conhecimentos anteriores influenciam e até condicionam a forma como os cientistas apreendem a realidade.
- O conhecimento científico é uma construção humana, empreendida com o intento de descrever, compreender e atuar sobre a realidade. Neste processo de criação intelectual entram em cena a imaginação, a intuição e a interação dos cientistas com o contexto sócio histórico e cultural no qual estão imersos.
- A produção e assimilação de um conhecimento se dão mediante a interação como os conhecimentos anteriores.

Para Kuhn (1979b), existem alguns significativos pontos de convergência entre as suas ideias sobre o desenvolvimento científico e as de Popper. Ambos se interessam muito mais pela dinâmica do processo de produção do conhecimento científico do que pela estrutura lógica associada aos produtos da pesquisa científica. Em face desse interesse, ambos procuram valorizar os dados e fatos provenientes da atividade científica real e, com frequência, se voltam para a história da ciência, com a finalidade de encontrá-los. Assim, segundo Kuhn:

Desse conjunto de dados partilhados, chegamos a muitas das mesmas conclusões. Ambos rejeitamos o parecer de que a ciência progride por acumulação; em lugar disso, enfatizamos o processo revolucionário pelo qual uma teoria mais antiga é rejeitada e substituída por uma nova teoria, incompatível com a anterior; e ambos sublinhamos enfaticamente o papel desempenhado neste processo pelo fracasso ocasional da teoria mais antiga ao enfrentar desafios lançados pela lógica, experimentação ou observação. Finalmente, Sir Karl e eu estamos unidos na oposição a algumas das teses mais características do positivismo clássico (KUHN, 1979b, p. 6).

Na continuidade de sua argumentação, Kuhn salienta que ambos enfatizam o “embricamento íntimo entre observação e teoria científica” (KUHN, 1979b), a dificuldade de produção de uma linguagem observacional neutra e que os cientistas inventam teorias explicativas para os fenômenos observados.

Em contrapartida, Popper, logo no início de sua exposição, enfatiza um trecho de sua obra, “A Lógica da Pesquisa Científica” (POPPER, 1975), em que ele antecipa o argumento kuhniano de que os cientistas trabalham sob uma “estrutura teórica definida”.

Depois de duas epígrafes tiradas de Schlick e de Kant, meu livro começa com as seguintes palavras: “Um cientista empenhado numa pesquisa, digamos no campo da física, pode atacar diretamente o seu problema. Pode ir logo ao âmago do assunto: isto é ao coração de uma estrutura organizada. Pois já existe uma estrutura de doutrinas científicas; e, com ela, uma situação - problema geralmente aceito. É por isso que ele pode deixar para outros o ajuste de sua contribuição à estrutura do conhecimento científico” (POPPER, 1979, p. 63).

Essa passagem, segundo Popper, “descreve a situação ‘normal’ do cientista de modo semelhante a Kuhn” (POPPER, 1979, p. 63). Embora discorde da descrição que Kuhn faz da ciência e considere a ciência normal uma atividade menor, Popper, assim como Kuhn, reconhece o importante papel da tradição no desenvolvimento da ciência.

Para Lakatos a ciência se desenvolve através da sua estruturação em Programas de Pesquisa. Um programa de pesquisa lakatosiano consiste de uma estrutura teórica geral e complexa que fornece orientação para a pesquisa futura. Essa estrutura possui um conjunto de pressupostos fundamentais a partir do qual o programa se desenvolve – o núcleo duro.

Por “decisão metodológica de seus protagonistas” (LAKATOS, 1979, p.165), o núcleo duro é considerado infalsificável. Esta diretriz – a heurística negativa - proíbe que frente a qualquer desacordo com os dados experimentais o núcleo seja considerado falso, transferindo-se a falsidade para outro setor da estrutura teórica – o cinturão protetor.

O cinturão protetor, cuja função é proteger o núcleo duro das possíveis refutações, é constituído por um conjunto de hipóteses, modelos teorias auxiliares e métodos observacionais. É sobre ele que recaem as sucessivas modificações necessárias a uma melhor correspondência entre o programa e os dados experimentais (SILVEIRA, 1996b; CHALMERS, 1993).

Na estruturação e desenvolvimento do cinturão protetor os cientistas são parcialmente norteados pela heurística positiva.

A heurística positiva consiste num conjunto parcialmente articulado de sugestões ou palpites sobre como mudar e desenvolver as “variantes refutáveis” do programa de pesquisa, e sobre como modificar e sofisticar o cinto de proteção “refutável” (LAKATOS, 1979, p.165).

Há uma certa semelhança entre o programa de pesquisa de Lakatos e o paradigma de Kuhn. Assim como o paradigma, o programa de pesquisa, através de suas heurísticas, orienta o cientista a acerca dos problemas que podem ser enfrentados pelo cientista e aqueles que devem ter o seu enfrentamento, estrategicamente, adiado ou evitado. Conforme o próprio Lakatos:

O programa consiste em regras metodológicas; algumas nos dizem quais são os caminhos da pesquisa que devem ser evitados (heurística negativa), outras nos dizem quais os caminhos devem ser palmilhados (heurística positiva) (LAKATOS, 1979, p.162).

Lakatos, apesar de sua grande afinidade intelectual com o pensamento de Popper, assimila alguns dos pontos de vista de Kuhn e os reelabora criticamente, à luz de alguns argumentos popperianos. Estabelece assim uma epistemologia que, ora o aproxima, ora o afasta de Kuhn e de Popper. Como Salienta Chalmers:

As abordagens de Lakatos e Kuhn têm algumas coisas em comum. Em especial, ambas fazem a seus relatos filosóficos a exigência de resistirem à crítica da história da ciência. O relato de Kuhn precede a metodologia dos programas de pesquisa científica de Lakatos e acho justo dizer que

Lakatos adaptou alguns dos resultados de Kuhn para seus próprios propósitos (CHALMERS, 1993, p. 124).

Mais adiante, Chalmers acrescenta que a abordagem de Lakatos pode ser vista como “a culminação do programa popperiano em uma resposta direta a ele, e uma tentativa de melhorar os limites do falsificacionismo” (CHALMERS, 1993, p. 124).

Feyerabend é, ao mesmo tempo, um severo crítico e um grande admirador da obra de Kuhn (FEYERABEND, 2007). Rejeita radicalmente o monismo teórico da ciência normal, ao qual contrapõe o pluralismo teórico. Contudo, mesmo que de forma suave, admite um certo apego dos cientistas aos seus pressupostos teóricos. Feyerabend postula que no processo de desenvolvimento da ciência é possível identificar a observância de dois princípios básicos, não excludentes, mas complementares: o princípio da tenacidade e o princípio da proliferação (FEYERABEND, 1979).

O princípio da tenacidade, até certo ponto, se aproxima de uma das características fundamentais da ciência normal - a adesão ao paradigma. Ele estabelece que o cientista resiste com a sua teoria, mesmo diante de dados experimentais que não a corroboram.

O princípio da tenacidade é racional porque as teorias são capazes de desenvolvimento, porque podem ser melhoradas, e porque podem finalmente ser capazes de acomodar as mesmíssimas dificuldades que, em sua forma original, se mostravam incapazes de explicar. Ademais, não é prudente confiar demasiado em resultados experimentais. Seria, com efeito, uma surpresa completa e até motivo de suspeita se toda evidência disponível viesse a sustentar uma única teoria, mesmo que acontecesse ser essa teoria verdadeira (FEYERABEND, 1979, p. 252-253).

Contudo, para Feyerabend o princípio da tenacidade é menos rígido que adesão dogmática ao paradigma, o que contribui para a proliferação de teorias.

O princípio da proliferação está relacionado ao pluralismo teórico, à busca de alternativas novas às teorias existentes. Para Feyerabend a proliferação de teorias ocorre em diversos momentos da

história da ciência e não apenas nos períodos pré-paradigmáticos ou revolucionários, como na análise de Kuhn.

Um tema em que as posições de Kuhn e Feyerabend são bem próximas é o da incomensurabilidade entre teorias. Para Feyerabend duas teorias rivais podem ter pressupostos tão distintos que se torna difícil para os seus protagonistas expressarem os conceitos básicos de uma teoria nos termos da outra.

Com a discussão da incomensurabilidade, chego a um ponto da filosofia de Kuhn que aceito com entusiasmo. Refiro-me à sua afirmativa de que os paradigmas sucessivos só podem ser avaliados com dificuldade e que eles podem ser de todo incomparáveis, pelo menos na medida em que estão em jogo os padrões mais familiares de comparação (eles podem ser prontamente comparáveis em outros sentidos). Não sei qual de nós foi o primeiro a usar “incomensurável” no sentido usado aqui (FEYERABEND, 1979, p. 271).

Dessa forma, não é possível a comparação lógica entre as duas teorias. Os argumentos de um possível debate são circulares, cada grupo defende como racional os critérios ditados por sua própria teoria, o que torna a discussão um “diálogo de surdos”. Um dos exemplos de incomensurabilidade apontado por Feyerabend e também por Kuhn refere-se à relação entre a mecânica clássica e a teoria da relatividade (FEYERABEND, 1979, KUHN, 1996).

Contudo Feyerabend, assim como Kuhn, considera que existe a possibilidade de diálogo, mediante o processo de tradução, que não elimina, mas ameniza a incomensurabilidade (FEYERABEND, 1979).

No processo de escolha entre teorias incomensuráveis Feyerabend compreende que, apesar dos critérios lógicos e racionais atuarem de forma significativa, estes por si só, não são suficientes para determinar a escolha de uma teoria. Entram em cenas as idiossincrasias individuais, os valores, metafísicos, filosóficos e estéticos dos cientistas em litígio. Embora a abordagem da Feyerabend seja ainda mais incisiva e provocadora do que a de Kuhn, dando margem às acusações de irracionalismo e relativismo, percebe-se que nesta questão há certa aproximação entre os seus pontos de vista (FEYERABEND, 1979; KUNH, 1996).

1.4 IMPLICAÇÕES PEDAGÓGICAS NA FORMAÇÃO DO FÍSICO – A EPISTEMOLOGIA HISTÓRICA DE KUHN E A EDUCAÇÃO CIENTÍFICA

Um dos méritos da epistemologia histórica de Kuhn reside em não tentar construir uma história da ciência em que os cientistas do passado sejam vistos como se pensassem e trabalhassem nos mesmos problemas que os aceitam atualmente. Tal reconstrução histórica conduz à ilusão de um passado demasiadamente simples, em que são subestimadas as dificuldades, de diferentes ordens, enfrentadas pelos cientistas no difícil processo de interação com a natureza, bem como as controvérsias, os erros e acertos inerentes ao processo de construção do conhecimento científico.

O papel desempenhado pela história na epistemologia de Kuhn, ao valorizar a influência do contexto sócio-histórico na gênese e transformação dos conhecimentos científicos, conferiu-lhe uma originalidade e alcance cuja repercussão não se restringiu às fronteiras disciplinares da história e filosofia da ciência, chegando à educação científica. Como salienta Zylbersztajn (1991, p.47): “No que diz respeito ao ensino das ciências em geral, e da física em particular, a obra de Kuhn evidenciou as limitações da visão cumulativa e contínua da natureza do conhecimento científico, que ainda predomina na ciência curricular”.

A complexa interação entre os fatores intrínsecos à ciência e os diferentes contextos sócio-históricos nos quais as teorias e conceitos científicos se desenvolveram, torna a epistemologia histórica de Kuhn particularmente interessante àqueles que defendem uma educação científica em que a ciência seja apresentada como uma atividade intelectual dinâmica e criativa que, a despeito da relativa autonomia de seus métodos, não é, de nenhuma forma, isenta de valores e imune a influência dos fatores externos de distintas ordens.

Contudo, se por um lado a análise kuhniana proporciona uma visão do processo histórico de construção da ciência muito mais rica e complexa do que aquela apresentada pelas concepções empíricas e pela historiografia tradicional, por outro esta análise também revela como, ao longo da história, curiosamente, a ciência instituiu-se como uma atividade extremamente fértil na produção de conhecimentos e ao mesmo tempo, “a mais rígida de todas as disciplinas e, em certas circunstâncias, a mais autoritária” (KUHN, 2006).

Esta ciência tem na educação científica um poderoso instrumento ideológico de reprodução da adesão estrita e dogmática das novas gerações de cientistas ao paradigma dominante.

A educação científica ‘semeia’ o que a comunidade científica, com dificuldade, alcançou até aí – uma adesão profunda a uma maneira particular de ver o mundo e praticar a ciência. Tal adesão pode ser, e é, de tempos em tempos, substituída por outra, mas nunca pode ser facilmente abandonada (KUHN, 1979a, p.55).

Em sua análise da educação científica Kuhn salienta o que considera ser uma de suas características mais marcantes: o fato de estar quase que exclusivamente baseada em manuais especialmente escritos para o estudante. Nesses manuais são apresentadas as generalizações simbólicas, os modelos e exemplares partilhados pela comunidade científica, definindo assim para o estudante o paradigma dominante. Ao que parece, há entre os cientistas um relativo acordo acerca do que o futuro profissional deve saber. Isso explicaria o uso dos manuais ao invés de uma combinação eclética de originais de investigação (KUHN, 1979a).

Os manuais são por excelência os “veículos pedagógicos destinados a perpetuar a ciência normal”. Em geral buscam familiarizar o estudante rapidamente com a estrutura conceitual do paradigma vigente; neste intento omitem de suas páginas quaisquer discussões de cunho histórico-epistemológico, resumindo-se a breves e esparsas alusões históricas aos temas abordados. A seleção de conteúdos, normalmente, prioriza fatos e acontecimentos, mencionando personagens que contribuíram de forma relevante para a estruturação e consolidação do paradigma vigente (PEDUZZI, 2001). Assim, os manuais “começam truncando a compreensão do cientista a respeito da história de sua própria disciplina” (KUHN, 1996).

Em sua técnica de apresentação dos assuntos os manuais científicos procuram, desde o começo, apresentar as “soluções concretas de problemas que a profissão aceita como paradigma”, exigindo-se então que os estudantes, usando lápis e papel ou servindo-se de um laboratório, resolvam por si mesmos problemas semelhantes ou redutíveis àqueles modelos. A ênfase na resolução de problemas tem por finalidade produzir rapidamente “quadros mentais fortes, ou *Einstellungem*”, à semelhança do ensino elementar de línguas, ou do treino de um instrumento musical (KUHN, 1979a).

No ensino de física, tradicionalmente, os problemas encontrados nos manuais e nos laboratórios são vistos unicamente como formas de

aplicação do conhecimento científico contido nas leis e teorias. Contudo, Kuhn compreende que o conteúdo cognitivo da ciência está fundamentalmente localizado não diretamente nas regras e teorias, mas nos exemplos compartilhados fornecidos pelos problemas (ZYLBERSZTAJN, 1991).

O papel identificado por Kuhn para a resolução de problemas relaciona-se com uma visão de educação científica enquanto processo de formação de membros de uma comunidade científica. É na resolução de problemas exemplares, tais como os problemas de queda livre, pêndulo simples e plano inclinado que os estudantes aplicam as versões apropriadas das leis físicas. A habilidade de reconhecer várias situações sob uma mesma *gestalt* é considerada por Kuhn como o principal ensinamento que um aluno adquire ao trabalhar os problemas exemplares, pois é desta forma que a sua percepção vai sendo moldada a uma forma peculiar de ver que é específica de uma comunidade científica particular (ZYLBERSZTAJN, 1998).

A descrição do caráter conservador da ciência normal, bem como da educação científica a-histórica a ela associada, constitui-se em um dos legados da epistemologia kuhniana. Não é preciso concordar com este modelo de educação científica rígida e dogmática para perceber que há uma grande correspondência entre ele e as práticas docentes vigentes no ensino de física, principalmente em nível superior. A compreensão dessa tradição de ensino - que foi construída historicamente, e que, portanto, não é eterna e imutável - embora não seja condição suficiente para a sua alteração, constitui-se em um primeiro passo para aqueles que compreendem que o ensino de física não deve se limitar apenas aos seus aspectos puramente técnicos; que é necessário articular o conhecimento científico aos seus aspectos históricos e filosóficos, conferindo aos futuros profissionais, cientistas ou professores, uma visão da ciência como uma atividade indissociável da configuração do mundo contemporâneo.

O treinamento científico dogmático, segundo Kuhn, contribui para desenvolver no cientista a habilidade para detectar as “anomalias” em relação ao comportamento da natureza, de certa forma, previsto pelo paradigma. Contudo, no que diz respeito à formação do professor, esta pedagogia tem-se mostrado não apenas limitada como contraproducente, tendo em vista que muitas pesquisas têm salientado a importância de se incorporar nos conteúdos curriculares da educação básica uma adequada compreensão da natureza da ciência, de como o conhecimento científico tem sido historicamente construído, o quê sem dúvida remete para a necessidade de inserção da HFC no ensino de física em nível

universitário, principalmente na licenciatura (MATTHEWS, 1995; MEDEIROS, 2000; DUARTE 2004).

Em relação à formação de cientistas, é possível afirmar que também se aplica muito do que já foi exposto em relação à formação de professores, afinal muitos cientistas exercem também a função de professor, e os problemas inerentes a esta atividade não podem ser enfrentados com base apenas no “senso comum pedagógico”.

É claro que alguns procedimentos da chamada educação dogmática (resolução de problemas, relatórios de atividades experimentais), são fundamentais para a formação do estudante, seja de licenciatura ou de bacharelado, entretanto, mesmo essas atividades tradicionais podem ser potencializadas, se a elas for articulada uma adequada reflexão didático-epistemológica. Como exemplo desse tipo de atividade pode-se apontar as pesquisas relacionadas à resolução de problemas, ao uso do laboratório e à formulação de estratégias de ensino inspiradas na epistemologia kuhniana, na qual o aluno em certos estágios é estimulado a se comportar como um cientista em período revolucionário e, em outros, como um cientista normal (ZYLBERSZTAJN, 1991; 1998; PEDUZZI; PEDUZZI S. 2001).

Os cientistas não são meros profissionais hiper especializados. Em decorrência de sua formação técnica eles muitas vezes são solicitados a desempenhar funções públicas relacionadas ao desenvolvimento de políticas científicas, tecnológicas, educacionais, de meio ambiente, etc. O encaminhamento dessas questões com frequência requer uma cultura humanística, e uma visão da ciência articulada a outros setores da sociedade, bem mais complexa do que aquela ensejada pelo treinamento dogmático. Neste sentido a história e a filosofia da Ciência podem contribuir para a formação cultural do cientista (MARTINS, 1990).

Retornando ao âmbito da formação específica, o uso da HFC em disciplinas de formação científica, ao promover à discussão dos conceitos e teoria fundamentais da Física sob um enfoque histórico e epistemológico pode contribuir significativamente para uma melhor apreensão desses conteúdos. Como se sabe, esses conceitos não são simples, apesar de terem sido, de certa forma, “naturalizados” pela linguagem “simplificada” dos manuais, e pela repetição excessiva dos exercícios standard (KUHN, 1979a). Proporcionar aos futuros professores – de nível médio ou superior – elementos para uma reflexão mais rica sobre algumas das dificuldades e obstáculos inerentes à gênese e compreensão desses conceitos, ao invés de causar confusão, pode suscitar nesses profissionais uma maior sensibilidade para compreender

por que, muitas vezes, os alunos não compreendem (BACHELARD, 1996, p.23).

2 CONSIDERAÇÕES EDUCACIONAIS

2.1 A FINALIDADE DA EDUCAÇÃO SUPERIOR E A FORMAÇÃO DE FÍSICOS

No mundo contemporâneo o conceito de universidade, em sua dimensão mais nobre, está associado ao ideal de assimilação, renovação e ampliação do patrimônio cultural, científico e tecnológico da humanidade. Articulada a esta missão acrescenta-se uma outra igualmente importante: a formação de quadros profissionais capacitados para o exercício das complexas atividades - administrativas, científicas, técnicas, educativas e culturais - necessárias ao funcionamento do Estado e da sociedade.

Os grandes desequilíbrios socioeconômicos presentes na sociedade contemporânea, traduzidos em um quadro de relativa, ou completa, exclusão de uma grande parte da população ao usufruto dos bens materiais e espirituais produzidos pela civilização moderna impõem à universidade e à educação superior, principalmente em países como o Brasil, uma tarefa inadiável. Faz-se necessário articular a formação de profissionais competentes para as mais diversas demandas do setor público e privado à formação de cidadãos socialmente responsáveis, assim como, lideranças intelectuais e científicas que pensem o desenvolvimento em suas múltiplas dimensões: econômica, social, científico-cultural e ambiental.

Nesta perspectiva, o diálogo com a cultura, a ciência e a tecnologia deve, em primeiro lugar, estar a serviço do enfrentamento das grandes questões que desafiam a sociedade. Entre elas a questão da Educação – em especial da Educação Científica em seus distintos níveis (RUIZ; RAMOS; HINGEL, 2007; SILVA, 2006; STUDART, 2005).

No Brasil, no plano político institucional, o papel da educação superior é explicitado na Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB/96), mais especificamente em seu capítulo IV, artigo 43º, que é reproduzido a seguir.

Art. 43º. A educação superior tem por finalidade:

I - estimular a criação cultural e o desenvolvimento do espírito científico e do pensamento reflexivo;

II - formar diplomados nas diferentes áreas de conhecimento, aptos para a inserção em setores profissionais e para a participação no

desenvolvimento da sociedade brasileira, e colaborar na sua formação contínua;

III - incentivar o trabalho de pesquisa e investigação científica, visando o desenvolvimento da ciência e da tecnologia e da criação e difusão da cultura, e, desse modo, desenvolver o entendimento do homem e do meio em que vive;

IV - promover a divulgação de conhecimentos culturais, científicos e técnicos que constituem patrimônio da humanidade e comunicar o saber através do ensino, de publicações ou de outras formas de comunicação;

V - suscitar o desejo permanente de aperfeiçoamento cultural e profissional e possibilitar a correspondente concretização, integrando os conhecimentos que vão sendo adquiridos numa estrutura intelectual sistematizadora do conhecimento de cada geração;

VI - estimular o conhecimento dos problemas do mundo presente, em particular os nacionais e regionais, prestar serviços especializados à comunidade e estabelecer com esta uma relação de reciprocidade;

VII - promover a extensão, aberta à participação da população, visando à difusão das conquistas e benefícios resultantes da criação cultural e da pesquisa científica e tecnológica geradas na instituição (BRASIL, 1997, p.16; 17).

Em sintonia com as finalidades da educação superior, as Diretrizes Curriculares Nacionais para os Cursos de Física estabelecem o perfil dos formandos e as competências e habilidades a serem adquiridas por estes. E, no caso específico da Licenciatura, busca-se também desenvolver nos formandos as competências e habilidades necessárias ao atendimento das finalidades da educação básica – em especial do ensino médio - fixadas na LDB/96 (BRASIL, 2001; BRASIL, 1997).

A LDB/1996 ao prefigurar uma reforma em todos os níveis da educação e configurar o ensino médio como uma etapa terminal da educação básica do cidadão retirou desse nível de ensino o seu caráter predominantemente propedêutico. Os desdobramentos suscitados por essa mudança no perfil do ensino médio estão delineados nas Diretrizes

Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (DCNEM), nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) e nos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos PCN – os chamado PCN+ (RICARDO, 2005; MENEZES, 2000).

A parte III dos PCN, direcionada à área de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias, representada pelas disciplinas de Matemática, Física, Química e Biologia, enfatiza que todas as áreas devem promover a aquisição de conhecimentos que correspondam a uma cultura geral contextualizada, possibilitando ao educando uma melhor compreensão do mundo (BRASIL, 1999).

Nesta perspectiva, a Física - os seus conceitos e definições - não deve ser apresentada como uma ciência acabada, reduzida a fórmulas e problemas, muitas vezes, desarticulados da realidade que circunda o aluno, ou ainda, esvaziados de seus efetivos significados físicos. Antes, faz-se necessário apresentar a Física, e a Ciência em geral, como uma atividade eminentemente humana, com uma dimensão histórica, filosófica e social.

Espera-se que o ensino de Física, na escola média, contribua para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais, situando e dimensionando a interação do ser humano com a natureza como parte da própria natureza em transformação. Para tanto, é essencial que o conhecimento físico seja explicitado como um processo histórico, objeto de contínua transformação e associado às outras formas de expressão e condução humanas. É necessário também que essa cultura em Física inclua a compreensão do conjunto de equipamentos e procedimentos, técnicos ou tecnológicos, do cotidiano doméstico, social e profissional (BRASIL, 1999, p.229).

Esta proposta de contextualização sócio-histórica do conhecimento científico é reiterada nos PCN+ (BRASIL, 2002).

Esse espírito de busca de uma maior aproximação entre a ciência e outras formas de conhecimentos, ao conceber a ciência e a tecnologia como formas de atividade cultural, abre um fértil campo de possibilidades para a exploração das potencialidades educativas da história e filosofia da ciência, tanto para os alunos, como para os

professores. Estes mediante uma reflexão pedagógico-epistemológica da história da ciência podem desenvolver uma visão mais tolerante, rica e didaticamente mais eficiente, sobre o papel do erro e dos obstáculos que o próprio conhecimento adquirido interpõe à efetiva assimilação do novo conhecimento (BACHELARD, 1996, 7-15).

Dentro deste espírito de valorização da Ciência, e em especial da Física, “como visão de mundo e como cultura em sua acepção mais ampla” (MENEZES, 2000), professor e aluno são, em diferentes níveis, herdeiros de uma rica e complexa tradição cultural, que se encontra em permanente construção e renovação (ZANETIC, 1989). Assim, aqueles que participam da pesquisa, do ensino e da aprendizagem dos conhecimentos científicos são herdeiros da humanidade: herdeiros de Arquimedes, Galileu, Newton, Darwin e Einstein, assim como, de Platão, Cervantes, Picasso, Machado de Assis, Villa-Lobos e Tom Jobim.

A tradição cultural da ciência, ao longo de sua história, foi construída não apenas pelas “grandes celebridades científicas” (MARTINS, 2006). No passado e no presente, um sem-número de pesquisadores, de diversas nacionalidades, tem contribuído com seus trabalhos, seus erros e acertos, para a permanente renovação de uma atividade que está indissociavelmente ligada à configuração do mundo moderno, tanto naquilo que ele tem de belo, quanto em seus graves problemas, que precisam ser enfrentados.

Nesta perspectiva, a história e a filosofia da ciência podem oferecer à educação científica além da grande beleza intrínseca e caráter pedagógico de suas reconstruções histórico-filosóficas, instrumentos de reflexão intelectual indispensáveis à formação de físicos – educadores e bacharéis – sensíveis à necessidade de se construir uma educação e uma pesquisa científica em que a física, em articulação com outras formas de conhecimento, como aqueles produzidos pelas ciências humanas e sociais, seja concebida como uma ciência a serviço da vida e promoção da emancipação do homem. Uma ciência para a compreensão e transformação da realidade.

2.2 A NECESSÁRIA APROXIMAÇÃO ENTRE A CIÊNCIA E AS HUMANIDADES

Atualmente muitos educadores em ciência defendem uma compreensão de ciência e tecnologia como cultura em sua acepção mais ampla (MENEZES, 2000; ZANETIC, 1998). Entretanto, esta concepção de ciência, ao que parece, ainda não foi assimilada e articulada à educação científica, em seus distintos níveis (DELIZOICOV;

ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002). A física escolar, não fornece subsídio para a compreensão da realidade que circunda o aluno; ela existe para que ao final de cada capítulo os alunos resolvam os exercícios que cairão na prova.

No ensino superior, além da resolução de listas de exercícios e preparação para os exames, ocorre o processo de iniciação à pesquisa. Contudo, essas atividades muitas vezes acabam por ser um fim em si mesmas. Qual o papel da ciência na configuração do mundo moderno? Quais ideias extracientíficas (filosóficas, religiosas ou estéticas) estiveram subjacentes aos critérios e valores que os cientistas utilizaram, em determinados momentos históricos, para determinar quais os procedimentos experimentais eram ou não científicos? Que teorias eram ou não válidas? Como a ciência contribuiu para que nos últimos cinco séculos o homem modificasse radicalmente a sua visão do universo e de si mesmo? Como a ciência, de uma atividade restrita a poucos sábios que em larga medida cultivavam a “arte pela arte”, ao se combinar com a técnica e depois com a tecnologia, se transformou em um instrumento indispensável à manutenção e reprodução do poder político e econômico de Estados Nacionais e grandes corporações econômicas? Será que questões como essas não deveriam ser discutidas no espaço universitário? Ou a formação de cientistas deve-se limitar à produção de “operários intelectuais” altamente especializados? As humanidades são úteis à formação de quadros científicos? A alfabetização humanística dos futuros professores e pesquisadores pode contribuir para que esses sujeitos do conhecimento, ao reconhecerem que a ciência não é neutra, façam a opção política por uma educação e uma pesquisa científica direcionadas para a consecução da meta ciência para todos?

Essas são questões de grande amplitude, que estão associadas à pertinência ou não da inserção da história e filosofia da ciência na graduação. A simples inserção dessas disciplinas, por si só, não é condição suficiente para a discussão dessas questões; contudo é uma condição necessária. Essa postura demanda uma interlocução com conceitos e ideias advindas das humanidades. Neste sentido a história e a filosofia da ciência, em especial a combinação de ambas (HFC), pode ser o ponto de partida para um necessário diálogo entre ciências e humanidades, buscando assim, formas de superação do hiato entre as chamadas “Duas Culturas” (SNOW, 1995). E, faz-se necessário destacar, a superação desse abismo não pode ser buscada num campo disciplinar especializado, mas num projeto que articule as várias disciplinas e que esteja efetivamente comprometido com a formação e, portanto, com o maior legado da humanidade: o conhecimento.

O papel da ciência no mundo contemporâneo não é uma questão que diz respeito apenas aos cientistas, assim como a guerra não diz respeito apenas aos generais e aos soldados profissionais. Não se faz ciência sem investimentos. E, quase sempre, esses investimentos são públicos.

Se o conhecimento científico veiculado pelos manuais como algo pronto e acabado apresenta uma relativa utilidade, não há dúvidas de que o professor e o professor formador não podem ser seus reféns. Este instrumento didático não é suficiente para a formação de quadros profissionais que se proponham ao enfrentamento das grandes questões contemporâneas. Portanto, precisar ser repensado.

Existe no imaginário das pessoas, mesmo entre cientistas, engenheiros e intelectuais, uma dicotomia entre ciência e humanidades. Como se a ciência e a tecnologia não fossem produzidas por homens, sob determinadas circunstâncias sócio-históricas. Contudo, sob uma perspectiva antropológica de cultura, a ciência e a tecnologia, assim como, os bens materiais delas advindos são bens culturais (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002).

Uma breve reflexão sobre as linhas gerais do desenvolvimento da ciência, especialmente a física, desde o Renascimento até século XX, articulada a algumas das transformações sócio-históricas que dificultaram, favoreceram e até se apropriaram do discurso científico, permite que se perceba que ciência moderna que emergiu no século XVII e, após sucessivas transformações chegou aos dias de hoje, não surgiu como uma atividade isolada, desconectada das grandes transformações sócio históricas e culturais de sua época.

Nos séculos XV e XVI, a Europa passou por grandes transformações políticas econômicas e sociais que estiveram associadas a um profundo processo de mudança espiritual que se refletiu na forma do homem conceber e investigar a natureza, assim como situar o seu papel no universo. Esse período de transição, de mudança de mentalidade é conhecido como Renascimento (DEBUS, 1996).

As primeiras manifestações culturais associadas ao Renascimento podem ser localizadas na Itália, no século XIV, nos trabalhos dos poetas Petrarca (1304-1374) e Boccaccio (1313-1375). Esses poetas defendiam a ideia de que a sua cultura era a herdeira da Antiguidade Clássica. A partir de então cresce o interesse pela literatura, pintura, escultura e filosofia grega. Este contato direto com a Antiguidade, sem a intermediação dos escolásticos, aos poucos provocou sensíveis mudanças.

O humanismo, estimulado pelo aprendizado clássico, impregnou todos os aspectos da vida cultural, ampliando-a estendendo suas fronteiras para muito além dos confins do simbolismo religioso, tão caro ao espírito medieval. Começou de modo crescente, a secularizar a vida dos homens, encorajando-os a reconhecer a beleza do mundo natural e não apenas em um mundo limitado pelas imagens sacras (RONAN; 1987, p.8).

Esse espírito de valorização do homem e da cultura clássica se espalha para outras partes da Europa e se intensifica ao longo do século XV, quando começam a chegar vários manuscritos gregos originais. Cresce a importância de se saber o grego e assim acessar esses textos, ou suas cópias diretas. O acesso a esses textos tornou-se mais fácil e econômico para um maior número de estudiosos a partir do desenvolvimento da imprensa por Johannes Gutenberg. O interesse pela Antiguidade volta-se, nesse período, também para os tratados científicos. Nos séculos XV e XVI os estudiosos passam a ter acesso a vários textos gregos de Ptolomeu, Aristóteles, Platão, Arquimedes, Galeno, Apolônio e outros. Neste processo os pensadores da Antiguidade ganham novas leituras e interpretações; as ideias de Platão e a obra de Arquimedes são revalorizadas; o próprio Aristóteles que emerge dessa releitura é muito mais rico do que aquele cristianizado pela tradição escolástica. Este diálogo com a Antiguidade é um dos traços das novas formas de investigação da natureza que começam a ganhar expressão (DEBUS, 1996; RONAN, 1987).

Ainda no século XV iniciam-se as grandes navegações, o Atlântico começa a ser enfrentado. Nesse empreendimento de grande importância foi a Escola de Sagres, um centro de investigações náuticas, concebido e implementado pelo Infante D. Henrique. Em Sagres concentrou-se todo o saber técnico e teórico da época relacionado à construção de navios, à Astronomia e a Cartografia (BRAGA; GUERRA; REIS, 2004). Os portugueses abriram novas rotas marítimas, criaram entrepostos comerciais e feitorias em regiões antes desconhecidas pelos europeus, ampliando consideravelmente o mundo conhecido até então. Essas viagens aumentaram o prestígio do país e trouxeram consideráveis lucros aos seus empreendedores. Além disso, forneceram aos estudiosos indícios concretos de que, malgrado o brilho dos pensadores antigos, havia muita coisa para ser descoberta e explicada (ALFONSO-GOLDFARB, 2004; RONAN 1987). Novos

mundos se descortinavam para o homem europeu. Nessa grande empreitada, que surpreendia e inspirava os sábios, os homens rudes e ambiciosos, muitas vezes iletrados, que conduziam os navios por mares desconhecidos, involuntariamente se tornavam partícipes de um grande processo de transformação cultural.

No final do século XV e início do século XVI a chegada dos espanhóis, e depois dos portugueses, a um novo continente impõe aos pensadores europeus um impacto cultural ainda maior. Juntamente com a “descoberta” de uma ampla variedade de espécies animais e vegetais, chegam notícias de povos com formas de organização social desconhecidas no velho mundo: desde civilizações comparáveis aos antigos gregos e egípcios até povos que, vivendo nus nas florestas tropicais, eram comparados aos primeiros habitantes do planeta, no mítico jardim do Éden (RIBEIRO, 1995; MARTINS, 1993).

A tradicional escolástica associada a um mundo mais estável e limitado, não era capaz de explicar as novidades desse novo contexto cultural que surgia para os europeus; o conhecimento dos antigos, embora servisse de inspiração para os novos pensadores, também não. Esta ampliação do mundo serviu de estímulo àqueles que defendiam com vigor a necessidade de se criar novas formas de conhecimento. As novas formas de investigação da natureza ao questionarem a autoridade absoluta dos pensadores antigos e começarem a valorizar, de forma crescente no estudo dos fenômenos, o uso da matemática, a experiência planejada e o saber empírico advindo das artes – a *techné*, estavam em sintonia com as novas forças sociais e culturais que, efetivamente, transformavam a sociedade, dando à história uma nova dinâmica. Esta mudança de atitude em relação ao estudo da natureza seria fundamental para a emergência da ciência moderna no século XVII (DEBUS, 1996; BERNAL, 1997).

Em 1543 aparece a obra *De revolutionibus orbium caeleste*, de autoria de Nicolau Copérnico, que vem a falecer um pouco depois de sua publicação (COPÉRNICO, 1996). Nesta obra, que já era esperada há algum tempo pelos seus contemporâneos, Copérnico desenvolve a hipótese de uma Terra móvel, girando em torno de si mesma e de um Sol fixo juntos com os outros planetas. Esta hipótese deixa para os astrônomos, filósofos naturais, clérigos e místicos uma série de novas questões, que, se por um lado assusta algumas autoridades religiosas e os pensadores ligados ao velho mundo das hierarquias celestes, por outro alimenta a imaginação daqueles que vislumbram um universo muito mais amplo do que o medieval. Ao lado dessas questões filosóficas e teológicas, há ainda, uma série de questionamentos

científicos que tornam bastante problemática a aceitação da hipótese copernicana (KUHN, 1990).

Durante a segunda metade do século XVI a teoria de Copérnico não será aceita; mas lentamente, em função de seu potencial explicativo, irá seduzir alguns eminentes astrônomos, que a utilizarão sob uma perspectiva instrumentalista. Uma notável exceção será Kepler, que assumirá plenamente a hipótese copernicana (MARTINS, 2003; KUHN, 1990).

Logo nos primeiros anos do século XVII, Kepler estabelece a lei das áreas e a lei das órbitas para o movimento planetário; conferindo ao modelo de Copérnico uma maior clareza e funcionalidade. Com isso torna-se inadiável para os físicos a construção de uma nova física que explique o modelo heliocêntrico (KUHN, 1990).

Ao longo do século XVII a nova filosofia natural, particularmente a física, atrai muitos dos mais talentosos estudiosos da Europa. Os trabalhos de Kepler, Galileu e Descartes, fornecem um importante aporte conceitual para a grande síntese newtoniana, consolidando definitivamente a nova filosofia da natureza – a ciência moderna.

Descartes, em seu: *Princípios da Filosofia* traça um primeiro esboço de uma física unificada para os céus e a Terra. Contudo, essa física é qualitativa, não sendo matematizável.

É com Isaac Newton que efetivamente surge uma física unificada para o cosmos e a Terra. Com os *Principia* de Newton, se desvanecem os argumentos que sustentavam a física e a cosmologia aristotélica. Emerge assim, uma única física para os mundos celeste e terrestre (KOYRÉ, 1991).

Os argumentos científicos e filosóficos que sustentavam as hierarquias cosmológicas foram, durante séculos, habilmente instrumentalizados pela Igreja para a manutenção das hierarquias políticas e sociais que caracterizavam a sociedade feudal. Com a destruição do cosmos aristotélico, ao menos no plano ideológico e simbólico, caem por terra também os pilares que davam suporte a anacrônica ordem feudal (BRAGA; GUERRA; REIS, 2004; KUHN, 1990). Percebe-se assim, que as ideias culturais e científicas, principalmente as astronômicas e cosmológicas, geradas neste período possuíam um notável potencial de transformação da ordem vigente.

Após as grandes controvérsias filosóficas, religiosas e científicas que marcaram o século XVII com a ferrenha oposição da Igreja às ideias cosmológicas suscitadas pela teoria de Copérnico – interpretada sob uma perspectiva realista -, o século XVIII marca o início de um período de relativa tranquilidade e crescente prestígio para a filosofia natural, ou

filosofia experimental como também era chamada a ciência moderna. As constrictões ideológicas da Igreja Católica tornam-se gradativamente mais amenas, e as correntes protestantes, em parte, já vinham articulando os valores da ciência à sua ética de valorização do trabalho e da iniciativa individual. A nova classe emergente – a burguesia – e os intelectuais a ela ligados veem com bons olhos a investigação científica, não apenas em função das aplicações práticas imediatas que resultam de algumas dessas investigações, mas também como fonte de inspiração para novas formas de se pensar o homem e seu lugar no universo, e novas formas de organização da sociedade (ALFONSO-GOLDFARB, 2004; BERNAL, 1997).

No século XVIII, definitivamente, a ciência se afirma como a forma suprema de racionalidade. As ideias científicas serviram de referência para um amplo movimento filosófico, com dimensão política, literária e artística. Este movimento – o Iluminismo - se desenvolveu, com diferentes matizes, em vários países, particularmente França, Alemanha e Inglaterra. Os iluministas se caracterizaram pela defesa da ciência e da racionalidade crítica, contra a superstição, a metafísica e o dogmatismo religioso (JAPIASSU; MARCONDES, 1996). A reorganização da sociedade e da cultura deveria estar em conformidade com a razão, devendo ser norteadas por novos valores e atitudes, cujos exemplos poderiam ser encontrados na ciência.

Os filósofos iluministas acreditavam que o “método científico”, que se mostrara tão poderoso no estudo da natureza, poderia ser aplicado ao estudo do homem e à reorganização da sociedade em bases mais justas (ABRANTES, 1998).

Uma das fontes de inspiração dos filósofos iluministas era a física newtoniana, sendo Voltaire um dos grandes responsáveis pela divulgação da obra de Newton na França. Durante este período floresce neste país a física matemática e a física experimental. Lavoisier, por exemplo, aspira construir uma “química newtoniana” e Laplace com base nos *Principia* desenvolve a sua Mecânica Celeste (ABRANTES, 1998).

Em meados do século XVIII, inicia-se na Inglaterra a revolução industrial com o desenvolvimento das primeiras máquinas a vapor e outras invenções. Em sua primeira fase, este surto de criatividade técnica se realiza de forma completamente autônoma do conhecimento científico que então se produzia. Contudo, os desenvolvimentos

subsequentes de alguns desses dispositivos acabam por gerar problemas cuja efetiva solução, só seria encontrada a partir de estudos científicos (BERNAL, 1997). Essa nova forma de interação entre *episteme* e *techné* é significativamente distinta daquela que se iniciara no Renascimento.

A partir da revolução industrial, principalmente ao longo do século XIX, verifica-se de forma ainda mais intensa, com desdobramentos visíveis na esfera da produção material, a confluência das ideias advindas das duas grandes formas de revolução que, segundo o pensador econômico Celso Furtado, configuraram o mundo moderno: a revolução científica e a revolução burguesa (FURTADO, 2008). Dessa confluência surgiu o capitalismo industrial. Neste novo estágio do capitalismo cada vez mais o desenvolvimento econômico será tributário do desenvolvimento científico (BERNAL, 1997).

Após os grandes progressos do século XVIII, a ciência que chega ao século XIX, definitivamente, não precisa mais ser legitimada pelos intelectuais. Ela já foi assimilada pela mentalidade moderna como uma forma de conhecimento superior, e como instrumento indispensável ao crescimento econômico.

A ciência desse período já sabia para que veio e passa a influenciar desde a mudança de currículos das escolas até o desenvolvimento das nações (quem não tivesse uma boa Ciência – como até hoje – perdia o trem da História). Nessa fase a Ciência não precisava ser justificada; ela era oficial e tinha o rosto do futuro do planeta (ALFONSO-GOLDFARB, 2004, p. 11).

É no século XIX que o termo ciência adquire a sua acepção moderna. Os antigos filósofos naturais saem de cena; surgem os cientistas: especialistas que se dedicam a estudos específicos; distintos, portanto, dos “filósofos ou técnicos que antes circulavam pelas áreas mais amplas e indefinidas da Filosofia Natural ou da Filosofia Experimental”. O cientista representa uma forma de conhecimento que se imagina, e é imaginada, como autônoma, objetiva, neutra e acima das constrictões sócio-históricas (ALFONSO-GOLDFARB, 2004).

Nesse novo contexto são as humanidades que, à luz da racionalidade científica, precisam justificar o conhecimento que produzem. É dentro desse espírito que Augusto Comte (1798-1857), funda o positivismo e inspirando-se na Física advoga a criação de uma Física do Social - a Sociologia.

Comte concebia a história da humanidade como uma sequência de três estágios evolutivos: o teológico; o metafísico e o positivo (COMTE, 1978). Ao longo desses estágios, o conhecimento humano teria avançado, tornando-se cada vez mais preciso e modelar. Com a filosofia positiva Comte vislumbra novos rumos para a organização da sociedade industrial.

Em suma, o espírito positivo, segundo Comte, instaura as ciências como investigação do real, do certo e do indubitável, do precisamente determinado e do útil. Nos domínios do social e político, o estágio positivo do espírito humano marcaria a passagem do poder espiritual para as mãos dos sábios e cientistas e do poder material para o controle dos industriais (GIANNOTTI, 1978, p. XII).

Sob a influência do ideário positivista, as formas de conhecimento associadas às humanidades, e que eram, de modo geral, investigadas pela filosofia, passam a se organizar como “disciplinas científicas”: História, Sociologia, Antropologia, Psicologia, etc, passando a constituir as chamadas ciências humanas e sociais.

No campo da História a intenção de transformá-la em uma ciência positiva, conduz os historiadores ao culto da objetividade dos fatos (CARR, 2006). Esta influência aparece também na História da Ciência, reforçando as ideias de desenvolvimento científico contínuo e cumulativo (ALFONSO-GOLDFARB; FERRAZ; BELTRAN, 2004).

Com o século XX, as críticas ao ideário iluminista, em certa medida retomado e ressignificado pelo positivismo, de crença na ciência e no progresso ilimitado começam, lentamente, a ganhar peso. A intensificação dessas críticas se deve à conjugação de diversos fatores associados às grandes transformações socioeconômicas, políticas, científicas e culturais que marcaram o século.

No plano científico a ciência, e a física em particular, tiveram um notável desenvolvimento. Logo nas primeiras décadas do século, a física passou por duas grandes revoluções: a Teoria da Relatividade e a Mecânica Quântica. Essas teorias puseram em xeque, alguns dos dogmas e princípios fundamentais da Física Clássica. Essas revoluções repercutiram entre os pensadores empenhados em compreender a ciência em suas dimensões sócio-histórica e epistemológica, estimulando as críticas às visões positivistas da ciência e seu desenvolvimento histórico.

Essa influência se revelou de forma mais expressiva nas obras dos filósofos Gaston Bachelard Karl Popper.

No plano político, econômico e social as mudanças também são profundas. Ocorre a primeira guerra mundial, a revolução russa e a crise do sistema capitalista, com a queda da bolsa de Nova York em 1929. A ascensão do fascismo anunciando, para os mais lúcidos, a iminência de uma nova guerra é um dos reflexos dessas traumáticas transformações. Assim, a crueza dos novos tempos contribuiu significativamente para minar a crença na razão iluminista e sua visão de progresso civilizatório.

Com a segunda guerra os efeitos destrutivos da racionalidade científica são ainda maiores do que na primeira. A bomba sinaliza de forma clara e inequívoca que o ideal de conhecer e controlar a natureza pode destruir a vida no planeta, definitivamente ciência não é sinônimo de sabedoria. O projeto Manhattan sinalizou o início de uma era de intensa intervenção estatal nos rumos da pesquisa científica e tecnológica, norteadada pela constante busca da hegemonia política econômica e militar (SCHWARTZMAN, 1979).

Durante a segunda metade do século XX o desenvolvimento científico e tecnológico é surpreendente. Contudo, a ordem política e econômica internacional não permite que os frutos desse desenvolvimento se estendam a todas as nações. Acentuam-se as diferenças entre os países que detém a capacidade de inovação científica e tecnológica e aqueles que não a detém. Assim, enquanto nos países do hemisfério norte o receio da ameaça socialista, combinada com a capacidade de organização dos segmentos sociais, permite uma distribuição de renda mais equilibrada, nos, então chamados, países do terceiro mundo, mais facilmente controláveis, os desníveis sociais são bem mais expressivos (FURTADO, 2008).

A partir dos anos 70, em diversos países, começam a ganhar destaque, para além dos círculos acadêmicos, as críticas à ideia de crescimento econômico ilimitado, e ao uso indiscriminado dos conhecimentos científicos e tecnológicos, sem levar em conta os seus possíveis efeitos sociais e ambientais. Dois eventos que sinalizam essas preocupações são: a Conferência das Nações Unidas sobre o Homem e o Meio Ambiente (Estocolmo 72) realizada em Estocolmo, em 1972 (BUARQUE, 2007) e o relatório, Os Limites do Crescimento, publicado em 1972 pelo Clube de Roma. Este documento chamava a atenção para “o crescimento exponencial, na época, do uso de combustíveis e a natureza finita das reservas fósseis, a explosão no crescimento populacional e a limitada capacidade para a produção de alimentos” (CRUZ; ZYLBERSZTAJN, 2001, p.184).

Duas importantes referências para a emergência dessas questões são os movimentos de contestação dos anos 60 e as críticas da nova Filosofia da Ciência ao Positivismo, nas obras de Kuhn (1996) e Feyerabend (2007).

Entre os educadores em ciência, com mais intensidade a partir dos anos 80, nota-se uma maior aproximação entre as pesquisas em ensino de ciências e as áreas de história e filosofia da Ciência, revelando a esses pesquisadores que, essas áreas, em especial a confluência entre ambas, (HFC) apresentam uma grande potencialidade pedagógica, que pode contribuir tanto para a formação dos alunos quanto para a área de educação em ciências (EL HANI, 2006; DUARTE, 2004; VILLANI, 2001; MATTHEWS, 1995).

Além disso, os desafios do mundo contemporâneo têm explicitado os limites da educação científica nos distintos níveis de ensino. O reconhecimento da não neutralidade da ciência, de que ela está indissociavelmente ligada aos desvios causados pela crença ingênua em um desenvolvimento ilimitado, não exclui a contrapartida desta não neutralidade: o fato de que ela também é parte da solução.

Ciência para que, e para quem? Esta é uma questão que uma educação científica contemporânea e progressista, comprometida com o bem estar coletivo, não pode se eximir de examinar, oferecendo subsídios para que cada aluno tornando-se um cidadão também o faça.

Esta prerrogativa não diz respeito apenas à educação básica, é uma tarefa que se impõe principalmente à formação científica na graduação, como se pode observar na LDB/96 e nas Diretrizes Curriculares para os Cursos de Física (BRASIL, 2001; 1997).

Dentro desse espírito, a formação de físicos, segundo uma perspectiva crítico-transformadora, deve procurar desenvolver nas diferentes práticas pedagógicas associadas às situações de ensino aprendizagem - desde a sala de aula, até uma seção de cinema ou uma conversa no café - uma maior aproximação com as humanidades, compreendidas aqui como os conhecimentos advindos da filosofia, da literatura, das artes, história e das demais ciências humanas e sociais.

Uma reflexão consistente e lúcida sobre o papel da ciência no mundo moderno, não apenas sob o ponto de vista técnico, mas também sob o ponto de vista cultural, não pode ser empreendida sem uma adequada interlocução com essas formas de conhecimento essenciais ao homem, enquanto ser com uma dimensão espiritual inata.

Nesta perspectiva, a história e a filosofia da ciência podem ser extremamente úteis como canais de comunicação entre a ciência e as humanidades, fornecendo aos estudantes, professores e pesquisadores

dessas distintas áreas, subsídios que lhes permitam perceber a ciência como uma atividade humana sócio-historicamente determinada (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002).

É imprescindível no atual momento histórico por que passa a humanidade e a sociedade brasileira a formação de professores e pesquisadores que pensem a ciência em sua dimensão sócio histórica. Como enfatiza Leite Lopes:

O objetivo da ciência e da tecnologia é libertar o homem ou criar um mundo governado pela repressão dos poucos ricos sobre os muito pobres? Estas são questões que precisamos estudar e tentar responder se quisermos formular propostas significativas para o desenvolvimento harmonioso das sociedades humanas, de acordo com sua herança cultural e identidade nacional no atual mundo em mutação (LOPES, 1998, p.144-145).

Para que essa postura seja, efetivamente, incorporada às ações práticas é necessário que o conhecimento científico, a partir do espaço privilegiado da universidade, seja concebido e cultivado, não apenas como um conjunto de ferramentas de caráter meramente utilitário, ou vinculado a interesses corporativos menores, mas que seja cultivado como um bem espiritual, e que os seus frutos contribuam para o bem estar da sociedade.

O diálogo entre ciências e humanidades precisa ser continuamente estimulado. A história e a filosofia da ciência, como mediadoras dessa interação, podem contribuir para a formação de pensadores, pesquisadores e educadores, sensíveis à necessidade inadiável de construção de uma ciência em que – como ilustra Bacon em sua utopia científica, “A Nova Atlântida” - o conhecimento científico seja também sinônimo de sabedoria e os seus frutos estejam voltados para a felicidade dos cidadãos (BACON, 1988).

2.3 A HISTÓRIA E A FILOSOFIA DA CIÊNCIA COMO INSTRUMENTOS DE REFLEXÃO PARA A SUPERAÇÃO DO SENSO COMUM PEDAGÓGICO

O mundo contemporâneo, indiscutivelmente, marcado pela presença da ciência e da tecnologia nos planos da vida material e cultural das distintas sociedades, tem passado nas últimas décadas por significativas transformações; o que tem gerado grandes desafios nas

esferas política, econômica e social, que se estendem à educação, em especial, à educação científica, em seus distintos níveis.

O reconhecimento das limitações da educação científica tradicional em face das demandas impostas pela chamada “sociedade da informação e do conhecimento”, levou as comunidades de pesquisadores em ensino de ciências, em diferentes países, a propor reformas nos currículos de ciências, visando o desenvolvimento de uma educação científica, mais eficiente, no que diz respeito à elevação do nível científico-cultural de todos os cidadãos e não apenas à formação de cientistas (DUARTE, 2004; MATTEWS, 1995).

Assim, a partir dos anos 80, vários documentos internacionais apontam para a necessidade de valorização da história e filosofia da ciência, ao defenderem o argumento de que o ensino de ciências não deve ficar restrito a mera apresentação dos produtos da atividade científica; é importante levar-se em conta os processos de construção do conhecimento científico, as dimensões históricas, filosóficas, sociais e culturais da ciência (EL-HANNI, 2006; MATTEWS, 1995).

A necessidade de se articular ao ensino de ciências/física novos enfoques e práticas docentes incidem também sobre os cursos de graduação em física, em especial sobre os cursos de licenciatura, devendo-se acrescentar ainda os cursos de formação continuada de professores. Ambas as modalidades de formação docente, vêm apresentando evidências de esgotamento de seus “saberes e práticas tradicionalmente estabelecidos e disseminados” (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002, p. 31).

A implementação de um ensino de ciência/física que esteja em sintonia com as demandas do mundo contemporâneo, passa por alguns desafios, dentre os quais Delizoicov, Angotti e Pernambuco destacam:

1. Superação do senso comum pedagógico
2. Ciência para todos
3. Ciência e Tecnologia como Cultura
4. Incorporar conhecimentos contemporâneos em ciência e tecnologia
5. Superação das insuficiências do livro didático
6. Aproximação entre pesquisa em ensino de Ciências e ensino de Ciências (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002, p. 31).

Dentre os desafios apontados, avalia-se aqui que a superação do senso comum pedagógico é a questão central a ser enfrentada pelos

pesquisadores e professores de física, pois esta concepção tácita sobre o que é a ciência e como ela deve ser ensinada, permeia as outras questões elencadas. Qualquer mudança efetiva nas abordagens e conteúdos a serem veiculados na educação científica, nos diferentes níveis de ensino, envolve necessariamente uma mudança de mentalidade, uma mudança cultural. Este processo passa pela reflexão crítica sobre as concepções epistemológicas explícita ou implicitamente articuladas às práticas docentes dos professores. Nesta perspectiva, a história e a filosofia da ciência aparecem como um conjunto de conhecimentos indispensáveis àqueles que pretendem dedicar-se à docência, seja na educação básica, ou na educação superior (BATISTA, 2007, PEDUZZI, 2007; ROSA; MARTINS; 2007).

No ensino de física o senso comum pedagógico pode ser associado a atividades como: o “uso indiscriminado e acrítico de fórmulas e contas em exercícios reiterados; tabelas e gráficos desarticulados ou pouco contextualizados relativamente aos fenômenos contemplados; experiências cujo único objetivo é a ‘verificação’ da teoria” (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002, p.32).

Tradicionalmente o ensino de física tem se caracterizado por práticas pedagógicas em que, explícita ou implicitamente, o processo de ensino-aprendizagem é norteado por uma concepção empirista do conhecimento, em que o aluno, concebido como uma *tabula rasa*, chega na sala de aula despido de quaisquer concepções acerca dos fenômenos físicos que o cercam, sendo marcante também, a ausência de qualquer tipo de reflexão histórico-epistemológica sobre o conhecimento científico. Neste cenário é comum encontrar entre professores e futuros professores concepções equivocadas sobre natureza da ciência e do trabalho científico à luz das reflexões dos filósofos e historiadores da ciência contemporâneos (GIL, et al., 2001). O que contribui para acentuar o divórcio entre ciência e cultura.

Reportando-se mais diretamente ao ensino de física na graduação, o físico Nelson Studart, ex-editor dos periódicos: Revista Brasileira de Ensino de Física e Física na Escola enfatiza, principalmente, para os não pesquisadores em ensino de física, uma questão recorrente nas discussões e foros nacionais e internacionais sobre o ensino de física. “De que forma professores de Física podem se beneficiar das pesquisas do processo ensino/aprendizagem de ciências?” (STUDART, 2001, p.259). Nesta perspectiva salienta a importância dos professores de física, não especialistas em ensino, iniciarem um diálogo com as pesquisas em Ensino de Física, com o objetivo de efetivamente articular os seus resultados e reflexões às suas práticas docentes. Usando como

referencia um *Guest Coment do American Journal of Physics* de abril de 2001, de autoria de Dom Holcomb, do Departamento de Física da Universidade de Cornell, salienta a necessidade dos não pesquisadores em Ensino de Física vencerem o habitual preconceito contra qualquer mudança substancial no ensino, sintetizado por expressões como: “Eu aprendi física de um certo modo e atingi um nível bastante satisfatório de conhecimento. Assim vou ensinar do jeito que aprendi. Se os estudantes de hoje se esforçarem vão aprender do mesmo modo que eu” (HOLCOMB, apud, STUDARD, 2001, p.259).

O diálogo entre os não especialistas em Ensino de Física e os pesquisadores dessa área pode ser extremamente profícuo, no sentido de iniciar uma cultura de prática docente em que os problemas relacionados ao ensino/aprendizagem de física possam ser enfrentados com uma maior “sensibilidade” pedagógica e epistemológica dos professores. Nesse diálogo, a contribuição da história e filosofia da ciência é seminal.

O potencial pedagógico da história e filosofia da ciência pode ser útil não apenas para estudante, futuro professor ou pesquisador, mas também para o seu formador. Para o professor universitário genuinamente interessado no progresso intelectual dos alunos uma bem fundamentada reflexão histórico-epistemológica da ciência pode oferecer instrumentos de reflexão que contribuam para a crítica e a transformação da postura tradicional do professor de ciências, que, não raro, apresenta uma grande dificuldade em compreender os “obstáculos pedagógicos”, que se interpõem à formação do pensamento científico do estudante, principalmente nas disciplinas básicas (DELIZOICOV, 2001).

Nos últimos anos a pesquisa em história e filosofia da ciência articuladas ao ensino de física, vem fornecendo importantes subsídios ao enfrentamento dos problemas relacionados ao ensino /aprendizagem de física (MEDEIROS, 2007; PAGLIARINI, 2007; BASSO, 2004). Há um relativo consenso entre os educadores em ciências de que se faz necessário articular as diferentes práticas didáticas e pedagógicas dos docentes, nos distintos níveis de ensino, às reflexões contemporâneas sobre a história e a filosofia da ciência.

Neste sentido, pode-se afirmar que a análise histórico-epistemológica da ciência, fornecida por essas disciplinas, vêm se configurando como um corpo de conhecimentos indispensáveis à formação docente, e a uma educação científica de qualidade (PEDUZZI, 2007; MARTINS, A. 2007; BATISTA, 2004).

2.4 A CONTRIBUIÇÃO DA TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA À ANÁLISE DO ENSINO TRADICIONAL DE FÍSICA

2.4.1 Introdução

Uma característica marcante da educação científica em nível superior, que se estende a outros níveis de ensino, reside no fato de esta basear-se exclusivamente em manuais (KUNH, 1979). Os estudantes em um curso de graduação em física, com exceção talvez daqueles envolvidos com atividades de iniciação científica, normalmente, não entram em contato com os artigos originais relativos à produção científica atual. Além disso, eles não são estimulados à leitura de clássicos do pensamento científico, tais como: *Duas Novas Ciências*, de Galileu Galilei, os *Principia* de Isaac Newton, ou o *Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo* de Maxwell (KUNH, 1979a).

Ao longo do curso os aspectos mais significativos das grandes construções científicas do passado que, de alguma forma, foram refinados e assimilados pela ciência contemporânea serão apresentados aos alunos de forma indireta, através intermediação do manual de ensino, uma ferramenta didática que historicamente passou a ganhar grande importância na educação científica à medida que crescia a complexidade e a especificidade da ciência e do trabalho científico.

Na física o uso dos manuais de ensino - textos preparados especialmente para os estudantes e professores de uma determinada disciplina – começou a se tornar expressivo no XIX, época de grande prestígio para nova filosofia da natureza que emergiu no século XVII, que passa então a influenciar de forma destacada a elaboração dos currículos escolares (ALFONSO-GOLDFARB, 2004; BRAGA; GUERRA; REIS, 2008).

Antes do século XIX, em diferentes períodos da história, os grandes textos científicos como, o *Almagesto* de Ptolomeu, os *Principia* de Newton e a *Eletricidade* de Franklin, entre outros, desempenharam durante algum tempo o papel de manuais científicos. Kuhn assinala que:

[...] estas obras e muitas outras foram utilizadas implicitamente e durante algum tempo, para definir os problemas legítimos e os métodos de investigação para sucessivas gerações de praticantes. No seu tempo cada um desses livros, juntamente com outros escritos segundo o modelo iniciado por eles, teve no seu domínio mais ou

menos a mesma função que têm hoje os manuais de uma ciência (KUHN, 1979a, p. 59).

Contudo, à medida que o conhecimento científico se desenvolvia, com novos métodos teóricos e desenvolvimentos experimentais que ampliavam e redefiniam o alcance do paradigma aceito pela comunidade científica, tornava-se, do ponto de vista didático, contraproducente a utilização desses textos no cotidiano do ensino ou na formação básica dos novos cientistas.

No caso dos *Principia*, por exemplo, este era um texto extremamente complexo e obscuro mesmo para os grandes cientistas. Além disso, a sua teoria foi consideravelmente refinada, clarificada e articulada à resolução de inúmeros problemas da mecânica terrestre e celeste. Um esforço constante e criativo de articulação do paradigma, desenvolvido por alguns dos melhores físicos e matemáticos dos séculos XVIII e XIX, cientistas como: Bernoulli, Euler, D'Alembert, Laplace e Lagrange, entre outros (KUHN, 1996; 1979a).

O manual de ensino foi a solução didática encontrada para transmitir ao aspirante a cientista as ideias básicas sobre o instrumental teórico e experimental, sobre o qual já havia consenso em um dada época. O uso do manual permitia uma boa economia didática, ao fornecer ao jovem estudante um texto em que as teorias do passado que se mostraram bem sucedidas e contribuíram de forma direta com o conhecimento atual eram revistas e reconstruídas, apresentando ao estudante uma visão linear e cumulativa do conhecimento científico.

A reconstrução dos conhecimentos científicos, norteadas pela funcionalidade didática, fazia com que a ciência apresentasse uma coerência interna, que segundo os seus formuladores, permitia uma apreensão mais rápida dos aspectos mais significativos das teorias aceitas pela comunidade científica. Isto permitia ao jovem cientista discernir entre uma variedade de problemas postos pela natureza, aqueles que a ciência de seu tempo dizia ser relevantes e passíveis de enfrentamento.

Assim, o surgimento e a disseminação dos manuais, resultaram da própria fecundidade da ciência, com a proliferação de vários campos de pesquisa, e com o crescente uso de novas ferramentas matemáticas e sofisticadas técnicas experimentais. Definitivamente, os grandes textos - malgrado a significativa contribuição que haviam prestado à ciência e a perenidade de sua mensagem que, mesmo adaptada, estava incorporada aos manuais - não se mostravam adequados às necessidades de uma ciência que queria avançar rapidamente, aproveitando do passado

apenas os conceitos e ferramentas que se mostrassem imediatamente úteis ao trabalho científico atual. O manual era, sob essa ótica, o instrumento adequado à formação dos novos cientistas.

Além da necessidade de se articular o saber científico à formação de novos quadros profissionais, outra demanda, não menos importante, se impunha aos estudiosos da ciência. Com o crescente processo de esoterização do conhecimento científico, tornou-se impraticável fazer com que o saber produzido pelos cientistas fosse compreensível a um público culto não especializado. Com isso surgem as adaptações do conhecimento produzido pelos cientistas, de modo a torná-lo compreensível a um público mais amplo.

Assim, a necessidade de divulgar o saber dos cientistas, para outros círculos da sociedade, bem como utiliza-lo na educação formal, atraindo novos jovens para a ciência, fez surgir a transposição didática - a arte de transformar o conhecimento científico produzido pelos cientistas em um conhecimento acessível a um público mais amplo. Neste processo o saber produzido pelo cientista ganha novos sentidos, mas guarda ainda algumas características que permitem associar a nova versão, “simplificada”, do conhecimento à sua matriz original.

2.4.2 O conceito de Transposição Didática

O conceito de Transposição Didática foi inicialmente proposto pelo sociólogo Michel Verret em 1975, em sua tese “Le temps des études”. Neste trabalho Verret assinala que os saberes ao deixarem o círculo restrito dos intelectuais e cientistas e se transferirem para círculos mais amplos, como é o caso de sistema de ensino, passam necessariamente por significativas transformações que os tornam compreensíveis nesses novos contextos (CHEVALLARD, 2005).

Em 1982, Ives Chevallard e Marie-Albert Johsua publicam um trabalho em que retomam o conceito de Transposição Didática e o articulam à análise das transformações sofridas pelo conceito matemático de distância, desde a sua introdução na comunidade científica em 1906, pelo matemático Maurice Fréchet (1878-1973), até a sua inserção, em 1971, nos programas de geometria da sétima série do sistema de ensino francês (ASTOLFI; DEVELAY, 2008). A partir de então, o conceito de Transposição Didática passa a ser discutido, divulgado e utilizado na área de ensino de matemática, daí se estendendo para a área de ensino de ciências. Em 1985, Chevallard publica a obra “La Transposition Didactique”, na qual sistematiza as suas

reflexões sobre o conceito de Transposição Didática (PINHO ALVES, 2000).

A Transposição Didática, ao analisar o processo de transformação do saber postula a existência de três estatutos, patamares ou níveis do saber: saber sábio (savoir savant), saber a ensinar (savoir à enseigner) e saber ensinado (savoir enseigné). Esses distintos saberes são produzidos pelo trabalho de diferentes sujeitos do conhecimento, pertencentes a distintos contextos epistemológicos, com valores e critérios de avaliação próprios e submetidos a diferentes tensões (PINHO ALVES, 2000).

A Transposição Didática é compreendida por Chevallard como o processo mediante o qual o saber produzido e referendado pelos cientistas – o saber sábio - diante da necessidade de ser inserido no sistema de ensino, sofre significativas transformações que o tornam um saber ensinável, potencialmente compreensível e utilizável na educação científica escolar – o saber a ensinar. No interior da escola este saber, através do trabalho didático do professor, transforma-se em um saber efetivamente ensinado ao aluno - o saber ensinado (CHEVALLARD, 2005).

O saber sábio

Antes de examinar as transformações do saber ao se transportar para outros níveis, convém analisar as transformações do saber sábio, em seu próprio nível, uma vez que aí já se pode identificar algumas características que se tornarão ainda mais acentuadas à medida que o saber elaborado se afasta de seu espaço original de construção e circulação.

O saber sábio é o nível de referência para a análise do processo de transformação do saber. É o saber elaborado, resultante do trabalho da comunidade científica. Este saber, tal qual é produzido originalmente, só é compreensível aos iniciados, estando assim, restrito ao círculo dos especialistas. Para que o saber sábio possa ser estendido a círculos mais amplos da sociedade ele deve, inexoravelmente, ser transformado.

As transformações sofridas pelo saber sábio em seu espaço original de construção e validação estão relacionadas às distintas características associadas aos contextos em que ocorrem a produção e a avaliação do conhecimento científico, conforme apontadas por Reichembach (1961) – o contexto da descoberta e o contexto da justificativa.

O conhecimento produzido por um ou mais cientistas, só adquire o status de conhecimento científico após ser criteriosamente debatido,

analisado e testado pela comunidade científica. A necessidade de tornar público este saber original (ainda que, em um primeiro momento, este público se limite a um restrito grupo de especialistas), faz com que ele sofra as suas primeiras modificações.

Ao se deslocar do contexto de sua produção, para o contexto em que é avaliado pela comunidade científica, o saber original produzido pelo cientista sofre, inevitavelmente, significativas transformações. No texto em que o cientista apresenta oficialmente o saber produzido à comunidade científica, este já se encontra consideravelmente adaptado para atender às exigências, expectativas e valores dessa comunidade. Assim, algumas características do contexto original de sua produção são, estrategicamente, deixadas de lado pelo pesquisador.

Na textualização do conhecimento científico ocorre a atuação de três processos: a despersonalização, a descontextualização e a dessincretização, que, conjugados, tornarão o conhecimento científico apresentado à comunidade científica isento de algumas características peculiares ao contexto original de sua produção.

A despersonalização do saber pode ser evidenciada na maior parte das publicações científicas. O saber científico é apresentado de forma impessoal, isento dos erros, reflexões e hesitações. O texto apresenta uma lógica de pesquisa “fictícia”, construída racionalmente, e que não corresponde, necessariamente, aos avanços e recuos que ocorreram no contexto da descoberta. Enfim, o saber se desvincilha das idiosincrasias de seu criador. Como observa Chevallard:

[...] Todo saber considerado in *statu nascendi* está vinculado a seu produtor e se encarna nele, por assim dizer. Compartilhá-lo, no interior da comunidade acadêmica, supõe um certo grau de despersonalização, que é requisito para a publicidade do saber (CHEVALLARD, 2005, p.24).

A descontextualização do saber manifesta-se na retirada de certos aspectos da história a qual estava ligada à pesquisa. Isto pode ocorrer em função do interesse do pesquisador em conferir à sua descoberta um caráter de universalidade, o que daria ao produto de sua pesquisa um grau maior de aceitação. Assim os produtos da pesquisa são dissociados do contexto original de sua produção (CHEVALLARD, 2005; PERRELLI, 1996).

A dessincretização do saber não se manifesta no contexto da descoberta; neste, os saberes são sincréticos, ou seja, estão articulados uns aos outros. Assim, um conceito não existe de forma isolada, a sua existência está condicionada à existência de outros conceitos. No texto científico o saber perde o seu caráter sincrético, os conceitos são apresentados desconectados de suas antigas ligações (RODRIGUES, 2001; PERRELI, 1996).

Dessa forma, no âmbito do saber sábio todo conhecimento produzido, para se tornar público, deve passar pelo crivo da comunidade científica. Contudo, este saber não é um dado bruto, acabado. Enquanto construção humana este saber apresenta uma relativa plasticidade, o que o torna passível às modificações que lhe conferem a capacidade de ser avaliado, à luz dos critérios de validação aceitos pela comunidade científica em um dado momento histórico.

O saber a ensinar

Este nível do saber resulta da primeira transposição do saber elaborado, para além da esfera de seus produtores. O trabalho de transformação do saber sábio em saber a ensinar é designado por Chevallard (1995) como “transposição didática externa”. Este empreendimento congrega um número de agentes, e variáveis, muito maior do que àquele envolvido na produção do saber sábio.

A esfera do saber a ensinar é heterogênea, sendo composta por uma ampla variedade de personagens - representantes de distintos setores da sociedade -, com diferentes interesses, valores e critérios de avaliação sobre a qualidade e a funcionalidade do saber a ensinar. Entre os componentes dessa esfera estão: os autores de livros textos ou manuais didáticos; os especialistas da disciplina; os professores; autoridades governamentais, e as sociedades científicas e intelectuais, que mesmo não atuando diretamente na esfera de poder, criam tensões que repercutem no processo de transformação do saber. Pode-se acrescentar, ainda, os meios de comunicação e a indústria dos manuais didáticos, ambos sob forte influência dos condicionantes da indústria cultural (SIQUEIRA, 2006; PERRELLI, 1996).

Nessa perspectiva, é ilusório pensar que a transposição do saber sábio para o saber a ensinar reduz-se a uma simplificação dos objetos do saber sábio. Pinho Alves chama a atenção para o equívoco de uma interpretação superficial deste processo:

À primeira vista somos levados a interpretar que o saber a ensinar é apenas uma mera “simplificação ou trivialização formal” dos objetos complexos que compõe o repertório do saber sábio. Esta interpretação é equivocada e geradora de interpretações ambíguas nas relações escolares, pois revela o desconhecimento de um processo complexo de transformação do saber (PINHO ALVES, 2000).

O trabalho de transformação do saber é uma atividade complexa, em que atuam injunções de diferentes setores da sociedade, de alguma forma, envolvidos no processo de produção do saber a ensinar. Como salienta Chevallard (2005, p.45): “*Todo projeto social de ensino e aprendizagem se constitui dialeticamente com a identificação e a designação de conteúdos de saberes como conteúdos a ensinar*” (grifo no original).

Na perspectiva da Transposição Didática, deve-se assumir que embora a esfera do saber a ensinar não produza um saber científico, ela produz, de fato, um novo saber. Este novo saber é gerado sob os condicionantes de ser ensinável e avaliável, portanto, inserível em um discurso didático, portador de regras e linguagens próprias. Assim:

[...] os objetos que figuram nos programas e livros didáticos como conhecimentos a serem ensinados não podem ser compreendidos apenas como simplificações ou decodificações daquilo que foi produzido de forma complexa pela comunidade dos sábios. Na verdade eles são resultado de um “preparo” didático que faz com que o saber escolar, embora definido a partir do saber sábio, seja qualitativamente diferente deste (PERRELLI, 1996, p. 70).

Na elaboração do saber a ensinar, o saber sábio passa por uma espécie de degradação. Ele é, de certo modo, desconstruído e reorganizado, de forma a adequar-se ao seu novo contexto. O resultado deste processo é materializado sob a forma textual. Nesta nova textualização os elementos que atuaram no processo de textualização do saber sábio voltam a atuar de forma mais incisiva, conferindo ao saber a ensinar novos atributos que o diferenciam do saber de referência que lhe deu origem.

Assim, o saber a ensinar, composto pelos conteúdos das disciplinas científicas, encontra-se fortemente marcado pelos processos que atuam em sua textualização: a despersonalização, a descontextualização e a dessincretização. A este novo saber corresponde um novo quadro epistemológico. Como salienta Pinho Alves:

Os processos de despersonalização, dessincretização e de descontextualização, aos quais o saber é submetido, faz com que ele seja despido de seu contexto epistemológico, histórico e linguagem própria. Como saber a ensinar é obtido um saber com uma nova roupagem, uma organização a-histórica, um novo nicho epistemológico e de validade dogmatizada (PINHO ALVES, 2000, p.227).

Na elaboração do saber a ensinar deve-se levar em conta as características que este saber deve ter para que possa ser potencialmente ensinável. Segundo Verret:

[...] uma transmissão escolar burocrática supõe quanto ao saber:

1º - a divisão da prática teórica em campos do saber delimitados que deem lugar às práticas de aprendizagem especializadas, isto é a dessincretização do saber.

2º - em cada uma dessas práticas, a separação do saber e da pessoa, isto é, a despersonalização do saber.

3º - a programação das aprendizagens e dos controles segundo seqüências racionais que permitam uma aquisição progressiva de conhecimentos específicos, isto é a programabilidade do saber.

E quanto à transmissão supõe:

1º - a definição explícita, em compreensão e em extensão, do saber a transmitir, isto é, a publicidade do saber.

2º - o controle regulado das aprendizagens segundo procedimentos de verificação que autorizem a certificação dos conhecimentos específicos, isto é o controle social das aprendizagens (VERRET, apud CHEVALLARD, 2005, p.67-68).

A dessincretização do saber retira-o de seu ambiente epistemológico, o que resulta na produção de saberes parciais, que se expressam na forma de um discurso autônomo, ou seja, os saberes são apresentados na forma de compartimentos estanques.

A descontextualização está associada ao trabalho de reconstrução didática que posiciona os saberes em novos contextos. Em verdade ocorre uma re-contextualização do saber, não no sentido de uma retomada do contexto do saber sábio, mas no sentido de que um novo contexto é construído, em função dos objetivos didáticos do texto.

A despersonalização completa o processo de confecção do saber a ensinar. Ainda que os livros textos façam alguma alusão aos personagens envolvidos na produção de um determinado conhecimento científico, o texto em si apresenta uma organização didática que prima pela impessoalidade. A mensagem transmitida é a de que, os cientistas envolvidos na produção de um determinado conhecimento já o formularam na forma pela qual são apresentados no texto.

Assim, como produto textual da transposição do saber para este novo patamar, obtém-se um saber que se apresenta sob uma estrutura fechada, dogmática, com uma sequência progressiva e cumulativa (PINHO ALVES, 2001).

O saber a ensinar se apresenta com uma linguagem nova. Nesta, surgem novos termos e situações que não existem no saber sábio, mas que são úteis ao processo de racionalização das sequências didáticas. Há a criação de objetos didáticos (CHEVALLARD, 2005). Em Física, por exemplo, pode-se apontar: a mecânica do colchão de ar, a noção de circuitos elétricos, os movimentos retrógrados e progressivos e a representação das partículas elementares como bolinhas coloridas. Pinho Alves (2000) salienta ainda: “Não podemos esquecer que geralmente os fenômenos são apresentados como dados da natureza e livres da intervenção humana, conforme o credo positivista, insinuando a ideia de neutralidade”.

O saber ensinado

A transformação do saber a ensinar em saber ensinado, aquele que o professor trabalha com os seus alunos, é designada por Chevallard como transposição didática interna, pois ocorre no interior da sala de aula (CHEVALLARD, 2005).

O saber a ensinar chega à educação formal basicamente sob a forma de manuais de ensino, nos cursos de formação técnica e científica, e livros didáticos, nas escolas destinadas à educação básica. Através dos

manuais os estudantes das carreiras científicas iniciam a sua familiarização com as teorias, ferramentas matemática e procedimentos experimentais que são aceitos pela comunidade científica e designados como saber a ensinar.

Em termos ideais os manuais de ensino atuais poderiam ser pensados como resultado da transposição direta do saber sábio para o saber a ensinar. Contudo, cabe observar que a estrutura básica de algumas teorias que são aceitas atualmente de forma consensual pela comunidade científica, como é o caso das disciplinas que compõem a física clássica, encontra-se bem estabelecida desde fins do século XIX, conquanto, ainda sejam feitas pesquisas nessas áreas. No caso da Mecânica Quântica e da Mecânica relativística, os seus fundamentos foram estabelecidos nas primeiras décadas do século XX. Assim, pelo menos em nível de graduação, é possível afirmar que, em larga medida, os manuais confeccionados atualmente ou nas últimas décadas não dialogam diretamente com o saber sábio produzido pelos cientistas, mas geralmente tomam como referência os manuais científicos mais antigos que fizeram a transposição direta do saber produzido pelos cientistas, para o saber a ensinar utilizado pelo professor no espaço universitário, principalmente nas disciplinas básicas.

Foge aos limites deste trabalho analisar as transformações do saber sábio desde a elaboração dos primeiros manuais até os dias atuais. Assim será assumido que o manual de ensino representa uma transposição do saber sábio para o saber a ensinar no espaço universitário.

É importante salientar que, para o docente interessado na melhoria da relação ensino-aprendizagem, a Transposição Didática fornece elementos de análise que lhe permitem identificar aspectos do processo de preparação e transmissão do saber a ensinar, há muito, esquecidos e naturalizados na tradição de ensino vigente:

1. Nos manuais os efeitos da desconstrução do saber sábio seguido pela sua reconstrução, sob a forma de saber a ensinar, encontram-se materializados no texto.
2. Os professores, em geral, aceitam e mesmo ignoram as deformações do saber sábio, presentes no texto. Isso é um dos efeitos da Transposição Didática.
3. Na textualização do saber a ensinar está implícita a assunção dos alunos como 'tabula rasa' (CHEVALLARD, 2005). Este pressuposto

também está, explícita ou implicitamente, presente nas práticas docentes, comumente, norteadas pelo senso comum pedagógico.

Ao tomar consciência da Transposição Didática o professor ganha uma importante ferramenta de análise, que lhe permite identificar as transformações que os conceitos científicos sofrem ao se transferirem para o saber a ensinar, exercitando o chamado “princípio de vigilância epistemológica” (CHEVALLARD, 2005, p. 51).

A utilidade da Transposição Didática para a prática docente é enfatizada por Pinho Alves:

Ao professor consciente da Transposição Didática, cabe a tarefa de criar um “cenário” menos agressivo ao dogmatismo apresentado pelos livros textos e minimizar a diferença entre os tempos didáticos e os tempos de aprendizagem. Mesmo sujeito a pressões dos grupos de sua esfera, o Professor deve buscar a criação de um ambiente que favoreça o rompimento com a imagem neutra e empirista da Ciência (PINHO ALVES, 2000, p. 234).

Avalia-se aqui que a HFC fornece uma valiosa contribuição à análise da tradição de ensino empreendida por Chevallard. Todavia, avalia-se também que, para além da crítica, a articulação da HFC ao ensino de física deve contribuir para a modificação das práticas docentes de caráter dogmático, a-histórico e a-problemático, ainda vigentes, subsidiando a formulação de novas estratégias para a abordagem dos conceitos e teorias em sala de aula.

2.5 A ARTICULAÇÃO DA HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA AO ENSINO DE FÍSICA E A BUSCA DE UM REFERENCIAL DE EDUCAÇÃO PROGRESSISTA

2.5.1 Introdução

Nas três primeiras seções deste capítulo, tomando como ponto de partida alguns documentos oficiais sobre a educação, a formação de físicos e o ensino médio, empreendeu-se uma reflexão educacional em que se enfatizou a importância da HFC para a educação científica em nível superior e na educação básica.

Em sintonia com um expressivo número de pesquisadores em ensino de física, defendeu-se a HFC como uma preciosa fonte de conhecimentos potencialmente capazes de subsidiar os professores de física, e de ciências em geral, com instrumentos intelectuais indispensáveis à construção de um ensino de física mais dinâmico, significativo e prazeroso, não restrito à mera transmissão dos produtos da ciência, ao treinamento dos estudantes no uso, muitas vezes deformado, de seu formalismo teórico e experimental. É claro que este formalismo possui uma grande beleza intrínseca. No entanto, no cotidiano das práticas docentes tradicionais, em nível médio e também na graduação, até mesmo esta beleza fica obscurecida.

Na construção desse novo ensino de física, ao lado da preocupação com o desenvolvimento e a apreensão das habilidades inerentes ao uso de seu instrumental teórico e experimental, os professores deverão ser capazes de, a partir da assimilação de novas práticas docentes, promover nos educandos o desenvolvimento de uma visão mais ampla da ciência/física ao apresentar e estimular nos educandos a reflexão sobre as várias dimensões da ciência: históricas, filosóficas, culturais e sociais.

A consecução desses objetivos, indiscutivelmente, impõe aos cursos de graduação em Física, principalmente os de Licenciatura, a necessidade de articular a história da ciência à formação dos futuros professores e pesquisadores. Todavia, que tipo de história da ciência deve ser apresentado aos estudantes? Como a história da ciência deve ser apresentada?

A resposta à primeira questão não é única. Contudo, é certo que uma concepção sobre a educação e o ensino de física de natureza conservadora, rígida e dogmática, levará o docente a optar por um tipo de história compatível com esta visão e que, portanto a reforce, contribuindo assim para a manutenção do ensino de física nos moldes em que é prevalente atualmente.

A resposta à segunda questão está intimamente vinculada à primeira. De modo que uma concepção de educação conservadora, rígida e dogmática, que considere o estudante como meros receptáculos de conhecimentos, conduzirá o professor à inserção da história da ciência mediante uma metodologia ancorada nesta perspectiva.

Ora, a reflexão tecida na seção 3.4 revela que a história da ciência é um corpo de conhecimentos produzidos na esfera do saber sábio e ao se transferir para o ensino de ciência, naturalmente, estará sujeita a transformações semelhantes àquelas que ocorrem com os conhecimentos

científicos e outras peculiares à sua especificidade. Isto pode ser facilmente percebido nos “arremedos de história da ciência” (ZANETIC, 1989) presentes nos diversos manuais de ensino presentes na educação básica e no ensino de física em nível universitário (MEDEIROS, 2007, PAGLIARINI, 2007). Dessa forma, exercício do “princípio da vigilância epistemológica” sobre o processo de “produção” dos saberes a ensinar, se aplica também a história da ciência, a princípio, um precioso instrumento intelectual para exercício docente dessa vigilância.

Neste trabalho avalia-se que a história da história da ciência a ser apresentada aos estudantes deve estar articulada a algumas das reflexões apresentadas pela historiografia e epistemologia contemporâneas. Esta opção proporcionará aos estudantes uma visão de ciência, e de seu processo de construção histórica, muito mais rica e complexa do que aquela, comumente, veiculada pelos nos manuais de ensino (KUHN, 1996).

A inserção de uma história da ciência que analise as múltiplas dimensões da empresa científica exige do educando uma atitude ativa de reflexão, de questionamento, enfim, de problematização do conhecimento histórico-epistemológico, daquele que implicitamente traz consigo (o conhecimento prévio) e daquele que o educador irá lhe apresentar - o conhecimento elaborado. Assim, a ação do educador deverá ser norteada por uma concepção de educação em que o diálogo, a reflexão e a problematização sejam atitudes valorizadas e consideradas fundamentais à efetiva apropriação dos novos conhecimentos.

Nesta perspectiva, faz-se necessário ao educador buscar subsídios teóricos e metodológicos em uma concepção de educação transformadora, que sinalize ao professor formador e aos futuros professores possibilidades de rupturas com os efeitos adversos do processo de transposição didática associados ao ensino tradicional de física e às práticas docentes a ele atinentes.

Diante desse imperativo buscou-se uma aproximação com a concepção de educação progressista e transformadora do educador Paulo Freire. Nas últimas décadas uma quantidade crescente de pesquisadores em ensino de ciências vem empreendendo esforços teóricos e ações práticas visando a construção e implementação de novas abordagens para o ensino de física, que em sintonia com a perspectiva freiriana, possibilitem aos estudantes a apreensão de instrumentos conceituais que lhes permitam, mediante uma melhor compreensão do mundo e de sua realidade imediata, atuarem conscientemente em sua transformação

(GEHLEN, 2009; DELIZOICOV, 2008, 2001, 1991; SLONGO, 1996; ANGOTTI, 1991).

2.5.2 Apresentação das premissas freirianas – a articulação da dialogicidade e da problematização ao ensino de ciências

A concepção de educação elaborada pelo educador Paulo Freire opõe-se radicalmente às diferentes vertentes da concepção de educação assentada no pressuposto de que a mente do estudante é uma “*tabula rasa*” que será preenchida pelos conhecimentos científicos, históricos, linguísticos, etc., transmitidos pelo professor no espaço da educação formal. Na concepção freiriana de educação os estudantes não são concebidos como objetos passivos, meros receptores do conhecimento transmitido pelo professor. Ao invés disso a educação, o ato educativo é concebido “como uma situação gnosiológica”.

Conceber a educação como uma “situação gnosiológica” significa a construção de um espaço de interação em que o educador e o educando devem estabelecer um respeitoso diálogo crítico acerca do objeto cognoscível (no caso o conhecimento), ou seja, o ato educativo se dá através de uma relação dialógica entre professor e aluno, e entre o aluno e seus pares. Ambos, educador e educando são sujeitos cognoscentes (FREIRE, 1992, p.78).

A dialogicidade do ato educativo, contudo, não se reduz a um diálogo gratuito, simples tagarelice. Ela tem como foco o objeto cognoscível, cuja apreensão é cointencionada pelos distintos sujeitos do conhecimento. Esses sujeitos possuem diferentes formas de conhecimento, e essas devem ser problematizadas. Desse modo, o diálogo educador-educando, educando-educador é pautado pela problematização do conhecimento.

A tarefa do educador, então, é a de problematizar aos educandos o conteúdo que os mediatiza, e não a de dissertar sobre ele, de dá-lo, de estendê-lo, de entregá-lo, como se tratasse de algo já feito, elaborado, acabado, terminado. Neste ato de problematizar os educandos, ele se encontra igualmente problematizado (FREIRE, 1992, p. 81).

No âmbito do ensino de física, e numa acepção mais ampla do termo problematização (que não remeta apenas aos problemas de lápis e papel), Delizoicov aponta duas dimensões para a problematização:

- a) Escolha e formulação adequada de problemas, que o aluno não se formula, de modo que permitam a introdução de um novo conhecimento (para o aluno), ou seja, os conceitos, leis e teorias da Física, sem o que os problemas formulados não podem ser solucionados.
- b) Um processo pelo qual o professor, ao mesmo tempo que apreende o conhecimento prévio dos alunos, promove a sua discussão em sala de aula, com a finalidade de localizar as possíveis contradições e limitações dos conhecimentos que vão sendo explicitados pelos estudantes, ou seja, questiona-os também. [...]. A intenção é ir tornando significativo, para o aluno, o problema que oportunamente será formulado (DELIZOICOV, 2001, p.133-134).

Esse pesquisador salienta ainda duas possibilidades de ação didático-pedagógica potencialmente capazes de contemplar as dimensões problematizadoras acima explicitadas. A primeira delas está relacionada à exploração didática de temas significativos, envolvendo questões sociais, relações entre ciência tecnologia e sociedade, ou ainda à busca de uma aproximação dos conteúdos específicos de Física de situações vivenciadas pelos estudantes no seu cotidiano. A outra possibilidade está articulada ao uso da história e filosofia da ciência no ensino de Física.

Parece claro que, por mais importantes que tenham sido os problemas e as perguntas relevantes feitas durante a História da Física que culminaram com a produção de conhecimentos, o significado dos problemas para um aluno no início do seu aprendizado de Física, no ensino médio e mesmo universitário, a priori não é o mesmo que para o físico ou professor de Física (DELIZOICOV, 2001, p.133).

É no âmbito da segunda possibilidade que se situa a pesquisa aqui empreendida. Dessa forma, o diálogo com a perspectiva freiriana e as

pesquisas em ensino de ciências a ela articuladas têm como objetivo subsidiar teórica e metodologicamente o pesquisador em seu esforço de refletir sobre a história da ciência, e a partir dessa reflexão selecionar e desenvolver materiais educativos assim como ações didático-pedagógicas voltadas a uma adequada inserção de temas da história da ciência no ensino de física em nível universitário, mais precisamente no âmbito de uma disciplina específica relacionada à história da física, que no presente caso intitula-se: *Evolução dos Conceitos de Física*.

Em um curso de graduação em física normalmente uma disciplina como esta se constitui no primeiro e talvez único contato formal que o estudante tem com tópicos da história e da filosofia da ciência. Tal situação ocorre também em outros cursos da área científica. De fato, várias pesquisas têm salientado que, em geral, os estudantes das carreiras científicas possuem poucos conhecimentos sobre a história e a filosofia da ciência. Dessa forma, a discussão crítica dos episódios históricos, ou do processo de produção e transformação das ideias científicas, esbarra em uma consolidada tradição de ensino na qual professores e estudantes têm arraigado em si, uma visão de ciência linear, cumulativa e a-histórica (EL HANNI, 2007; MOREIRA, MASSONI; OSTERMANN, 2007).

Todavia, ainda que poucos, os estudantes chegam a uma disciplina sobre a história da física com alguns conhecimentos históricos e epistemológicos. É plausível supor que, ao longo de sua formação, o estudante, de alguma forma, tenha assimilado alguns conceitos e muitos pré-conceitos relativos à história da física e à reflexão epistemológica. Isto pode ter ocorrido no ambiente universitário ou fora dele, através das interações sociais, de leituras recreativas, estudo das disciplinas específicas, aulas, palestras, etc.

Dessa forma, essas pré-noções históricas e epistemológicas (implicitamente presente nos manuais e nas práticas docentes tradicionais) trazidas pelos estudantes são consideradas aqui como conhecimentos prévios ou cultura primeira. Por outro lado, os conhecimentos advindos das reflexões históricas e epistemológicas contemporâneas serão considerados como cultura elaborada (SNYDERS, 1988). Com frequência, os conhecimentos advindos das reflexões históricas e epistemológicas contemporâneas se contrapõem às pré-noções históricas e epistemológicas adquiridas pelos estudantes nos estudos das disciplinas científicas, normalmente excessivamente presas aos manuais de ensino. Daí então a necessidade da relação dialógica, do diálogo problematizador em torno das preconcepções histórico-

epistemológicas tacitamente adquiridas pelo educando nas diferentes disciplinas da graduação.

Para que a cultura primeira do educando seja superada o educador precisa compreendê-la, para, através da problematização, criar o estímulo para a sua superação; “dar enfim à razão razões de evoluir” (BACHELARD, 1977, p. 151), isto é, apreender os novos sentidos e significados advindos da cultura elaborada. O trabalho intelectual inerente à superação da cultura primeira, certamente, só pode ser empreendido pelo estudante. Todavia o papel do professor não é o de mero espectador inerte; o seu papel como agente indutor dessa transformação é fundamental. Delizoicov (1991), inspirando-se na epistemologia de Kuhn atribui à dialogicidade da relação educador-educando uma função tradutora entre as duas culturas, até certo ponto, “incomensuráveis”. O professor teria então em sua tarefa educativa uma função tradutora entre as diferentes concepções de conhecimento atinentes aos dois “paradigmas”, através do diálogo tradutor o professor estimula nos alunos o estímulo para a ruptura com as suas concepções prévias ou cultura primeira.

Uma possibilidade de estabelecer uma dinâmica de atuação docente em sala de aula, segundo a perspectiva dialógica e problematizadora de Freire, é estruturada em Delizoicov (2008,1991) e Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), no que se convencionou denominar *momentos pedagógicos*: problematização inicial, organização do conhecimento e aplicação do conhecimento. Esses momentos, apesar de distintos, não devem ser interpretados como uma sequência rígida de etapas estanques, mas como constituintes de uma dinâmica de trabalho pautada pela articulação dialética estabelecida por eles.

Problematização inicial

Antes da apresentação formal do conteúdo o professor estabelece um diálogo com os alunos acerca do conteúdo que será desenvolvido. A partir de um pequeno número de questões que, normalmente, os alunos não levantam e que só podem ser encaminhadas mediante o conhecimento histórico e epistemológico, o professor inicia o seu processo de apreensão dos elementos significativos do conhecimento prévio dos alunos. A seguir o professor passa a problematizar o conhecimento que os alunos vão expondo. As questões podem ser inicialmente discutidas em pequenos grupos e depois entre os vários grupos que compõe a classe, conforme sugere Delizoicov (2001).

Nesse momento, cabe ao professor criar condições para que os alunos possam expor sem constrangimentos os seus posicionamentos em relação às questões em pauta. O professor deve coordenar e fomentar a discussão. Ao invés de simplesmente responder e explicar, o professor questiona os posicionamentos aguçando as suas possíveis contradições e inconsistências, em face do conhecimento histórico-epistemológico contemporâneo.

O ponto culminante da problematização é fazer com que o aluno sinta a necessidade da aquisição de outros conhecimentos que ainda não detém, ou seja, procura-se configurar a situação em discussão como um problema que precisa ser enfrentado (DELIZOICOV, 2001, p.143).

Organização do conhecimento

Os conhecimentos necessários ao encaminhamento das questões discutidas anteriormente são agora sistematicamente estudados pelos alunos, sob a orientação do professor. Assim, percebe-se que os conhecimentos elaborados – científicos, históricos e epistemológicos - configuram-se como ponto de chegada (GEHLEN, 2009; DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002).

Neste momento, o professor fornece explicações, clarificando os conceitos e posicionamentos estudados pelos alunos, cotejando-os com as suas concepções anteriores. Alguns dos posicionamentos epistemológicos contemporâneos, ainda que não convergentes entre si, podem ser explicitados para os alunos, permitindo a estes perceberem que a reflexão epistemológica sobre a física e a sua história não se encerra em uma única interpretação.

Aplicação do conhecimento

Neste estágio, os alunos são colocados diante de questões de natureza científica e histórico-epistemológicas em que as resoluções e encaminhamentos só se tornam possíveis mediante a interação com os novos conhecimentos apreendidos. Delizoicov argumenta que este momento:

Destina-se, sobretudo, a abordar sistematicamente o conhecimento que vem sendo incorporado pelo

aluno para analisar e interpretar tanto as situações iniciais que determinaram seu estudo quanto outras situações que, embora não estejam diretamente ligadas ao motivo inicial, podem ser compreendidas pelo mesmo conhecimento (Delizoicov, 2001, p.143-144).

Por exemplo, os alunos podem ser solicitados a identificar e analisar em filmes, documentários, revistas de divulgação científica, livros didáticos e paradidáticos, afirmações ou procedimentos em que estejam explícitas ou subtendidas as posições epistemológicas dos autores.

É importante assinalar que a problematização perpassa os três momentos pedagógicos, que se articulam e manifestam ao longo de todo o processo.

3 HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA NO ENSINO DE FÍSICA

3.1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente a educação científica, em seus distintos níveis, tem apresentado a Física como corpo de conhecimentos estruturado sob uma lógica interna em que os aspectos históricos e filosóficos associados à gênese das teorias científicas têm pouca ou nenhuma importância, sendo valorizado, única e exclusivamente, o produto da atividade científica. Esta forma de apresentação da Física começou a se tornar padrão em fins do século XVIII e início do século XIX, época em que a ciência, após os grandes êxitos da mecânica newtoniana e o notável desenvolvimento de vários ramos da física e outras ciências naturais, se impôs no cenário cultural europeu, passando a ver-se e a ser vista como a uma forma superior de conhecimento, autônoma e neutra, em relação às injunções do contexto sócio histórico, nos moldes preconizados pelo ideário positivista.

Nessa época, a comunidade científica passou a atuar de forma mais incisiva na elaboração dos currículos das universidades e escolas. O saber da comunidade científica, de forma crescente, começou a se integrar à educação formal (ALFONSO-GOLDFARB, 2004). Na elaboração deste saber a ensinar, os pressupostos, valores e atitudes, construídos historicamente pela comunidade científica, materializados nos artigos e tratados científicos, passaram a atuar na confecção dos manuais de ensino (KUHN, 1979a), conjugados aos imperativos didáticos associados à fabricação deste saber ensinável aos não iniciados.

Assim, sob a ótica dos manuais, a educação científica adquiriu um caráter dogmático e a-histórico, reproduzindo uma imagem distorcida de ciência associada às concepções empírico-indutivistas, ainda muito presente nos cursos de física e nos manuais de ensino atuais (MOREIRA; MASSONI; OSTERMANN, 2007; PAGLIARINI, 2007).

Dentro desse espírito, dogmático e a-histórico, a única função da história da ciência seria a de legitimar a ciência estabelecida, reduzindo à categoria de erros, tolices e superstições, todos os empreendimentos científicos do passado que não se enquadrassem em uma linha evolutiva que conduzisse à ciência atual (KUHN, 1996).

Contudo, o estudo história da ciência, à luz das reflexões contemporâneas da nova história da ciência, é capaz de revelar uma imagem da ciência bem diversa daquela tradicionalmente veiculada pelos manuais de ensino e haurida pelos próprios cientistas (KUHN,

1996). Esta nova imagem de ciência é boa ou ruim? A resposta não é única, e depende, fundamentalmente, do tipo de cientista, professor ou cidadão que se deseja formar.

Ao longo do século XX, as notáveis transformações políticas, econômicas e sociais que ocorreram dificilmente podem ser dissociadas do desenvolvimento científico. Por outro lado, essas grandes transformações no contexto sócio histórico foram contemporâneas de profundas transformações no fazer científico e na reflexão histórico filosófica sobre ele, conduzindo assim a emergência de novas visões sobre a ciência que destoam consideravelmente da visão empírico-indutivista propagada pelo positivismo e, sob muitos aspectos, ingenuamente cristalizada no ensino de física.

Nos capítulos anteriores procurou-se explicitar que essa concepção de ciência, a partir dos anos 30 do século XX, passou a ser crescentemente criticada por historiadores e filósofos da ciência. Essas críticas ganharam novos contornos e projeção a partir dos anos 60, com a obra de Kuhn e as reflexões por ela suscitadas. Desde então, tornou-se insustentável entre os historiadores, filósofos da ciência e mesmos cientistas, mais afeitos à reflexão histórico-filosófica, a defesa de uma ciência neutra, objetiva e autônoma, não obstante o compromisso que toda teoria científica deve ter com os dados experimentais e observacionais.

Nesta perspectiva, novos desafios se colocam à formação de professores e cientistas. Por um lado existe uma tradição de ensino de física reconhecidamente limitada diante da necessidade premente de se articular uma adequada educação científica a amplos setores da população, na perspectiva de uma ciência para todos. Por outro, esta mesma tradição de ensino, quando associada à formação de nível superior é vista como inevitável, “sempre foi assim”. Isso a despeito dos notáveis índices de reprovação verificados nos cursos de física, algo que não deve ser atribuído exclusivamente à dificuldade intrínseca dos conhecimentos científicos, mas também a forma dogmática e dura como esses conhecimentos vêm sendo apresentados, sem espaço para a reflexão epistemológica a cerca da dificuldade de apreensão desses conhecimentos.

Dessa forma, a história e a filosofia da ciência podem ser úteis à criação de um cenário pedagógico em que a aprendizagem dos conceitos fundamentais da física possa ser estimulada e otimizada entre os estudantes.

Existem argumentos favoráveis e contrários a utilização didática da história da ciência. Um exame desses argumentos torna-se

necessário àqueles que desejam explorar de forma adequada o seu potencial educativo.

3.2 ARGUMENTOS FAVORÁVEIS À UTILIZAÇÃO DIDÁTICA DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA

Nas últimas décadas, como desdobramento de uma aproximação entre as pesquisas em ensino de ciências e as reflexões dos pensadores da chamada nova história da ciência, tem crescido entre os educadores em ciência/física a percepção de que o ensino de física não deve disseminar uma visão desta ciência dissociada de seus aspectos históricos e filosóficos. Nesta perspectiva, como salienta Zanetic, emerge:

[...] a necessidade de se apresentar, ao lado do formalismo matemático e da iniciação experimental, um panorama da evolução das teorias centrais constituintes da física. Esta evolução compreende duas abordagens complementares, uma oferecida pela filosofia das ciências naturais, a outra pela história da ciência (ZANETIC, 1989, p.104).

Além das pesquisas acadêmicas, a defesa de uma educação científica menos rígida, mais atenta às dimensões históricas, filosóficas, sociais e culturais da ciência, consubstanciou-se também em uma série de documentos internacionais de reforma curricular enfatizando a compreensão da natureza da ciência como um componente central da alfabetização científica (EL-HANI, 2006, MATTEWS, 1995).

A comunidade de pesquisadores em ensino de ciência tem defendido a utilização didática da história da ciência através de vários argumentos que, de certa forma, se sobrepõem. Alguns desses argumentos são comentados a seguir, sendo de distintos modos relevantes para o estudante de ciência/física em sua condição atual ou em sua futura atuação como docente, ou pesquisador sensível a uma compreensão mais ampla acerca das entre relações ciência e cultura ou ciência, tecnologia e sociedade.

Um importante argumento em defesa do uso pedagógico da história da ciência apoia-se nas pesquisas de Piaget e Garcia (1987) que apontaram possíveis paralelos entre o desenvolvimento histórico de alguns tópicos científicos e o desenvolvimento cognitivo dos estudantes,

traduzido nas chamadas concepções alternativas. Embora tal paralelismo deva ser visto com reserva pelo professor, dada a relativa distância entre as ideias intuitivas dos estudantes e a sofisticação intelectual das construções científicas do passado, além das diferenças entre os contextos históricos, o reconhecimento da existência dessas concepções, mediado pela abordagem histórica, pode ser de grande utilidade na relação professor-aluno-conhecimento. Assim, o estudo da história da ciência pode sugerir ao professor o desenvolvimento de estratégias pedagógicas que permitam ao aluno o diálogo crítico-transformador com essas concepções, que se manifestam não apenas entre os estudantes da educação básica, como também entre muitos estudantes do nível universitário (MEDEIROS, 2007; PEDUZZI, 2001; 1998).

O desenvolvimento de visões mais adequadas sobre a natureza da ciência é uma outra importante utilidade pedagógica da história da ciência. A literatura tem explicitado que não apenas os estudantes, mas muitos professores e mesmo cientistas, são portadores e disseminadores de concepções equivocadas sobre a natureza da ciência. Essas concepções equivocadas, no caso de professores em serviços e estudantes de licenciatura em física, acabam resultando em práticas docentes inadequadas (MOREIRA; MASSONI; OSTERMANN, 2007; GIL et. al., 2001; MEDEIROS; BEZERRA FILHO, 2000). Em relação à contribuição da história da ciência para o desenvolvimento de visão mais adequada da natureza da ciência Martins assinala:

O estudo adequado de alguns episódios históricos também permite compreender que a ciência não é o resultado da aplicação de “um método científico” que permita chegar à verdade. [...] O processo científico é extremamente complexo, não é lógico e não segue fórmula infalível. Há uma arte da pesquisa, que pode ser aprendida, mas não uma seqüência de etapas que deve ser seguida sempre, como uma receita de bolo. O estudo histórico de como um cientista realmente desenvolveu sua pesquisa ensina mais sobre o real processo científico do que qualquer manual de metodologia científica (MARTINS, 2006, p. XIX).

A apreensão e o refinamento intelectual dos conceitos, definições, leis e modelos científico é outra utilidade pedagógica da história da ciência (BATISTA, 2007, 2004). Assim, através de uma adequada e

bem fundamentada reconstrução histórico-filosófica do processo de construção de algumas ideias científicas é possível ressaltar para o estudante a articulação entre os conteúdos de diferentes disciplinas (MATTOS; HAMBURGUER, 2004), além de estimular, através da leitura, discussão e escrita, o desenvolvimento de habilidades intelectuais não contempladas nas tradicionais atividades de resolução de problemas de lápis e papel, e atividades experimentais. Em relação à resolução de problemas, a análise epistemológica de Kuhn (1996) contribui para a valorização desse instrumento de aprendizagem pelo professor, ao destacar a importância da interação entre teoria e problema, invertendo uma lógica muito comum entre os professores que pressupõe que os alunos só começam a resolver os problemas após dominar completamente a teoria. Na contramão desta crença, Kuhn ressalta que a teoria também pode ser aprendida através da resolução de problemas (PEDUZZI; PEDUZZI, S, 2001; ZYLBERSZTAJN, 1998).

A discussão histórico-epistemológica de uma teoria científica pode estimular uma melhor compreensão dessa teoria, a apreensão de sua beleza intrínseca, o seu alcance e sua limitação na interpretação da realidade.

A História é o foro, onde a análise conceitual pode ser feita; ela permite rever conceitos, criticá-los, recupera significados e os entende à luz de novas descobertas. Ela é, pois, o instrumento de formação intelectual e assimilação de conceitos. Consequentemente, a História de uma ciência é essencial à heurística da descoberta científica. Ela é o instrumento de formação de pensadores (DIAS, 2001, p. 226).

A formação crítica do professor de física pode ser estimulada através da história e filosofia da ciência em articulação com as disciplinas pedagógicas, oferecendo ao futuro professor aporte conceitual que lhe permita exercer uma constante e criativa vigilância epistemológica em seu trabalho didático, permitindo-lhe identificar, minimizar e mesmo superar as omissões e distorções histórico-filosóficas, assim como caráter estanque dos conteúdos, presente nas sequências didáticas apresentadas nos livros textos, produto indesejável, mas inerente ao tradicional processo de Transposição Didática do saber sábio ao saber a ensinar.

O estudo da história da ciência pode suscitar o surgimento de “ideias inovadoras e uma nova visão de mundo e da cultura científica, validando a relação cultura-intelectualidade” (BATISTA, 2007, p. 260). A física é uma ciência de inegável beleza intrínseca, cujos conceitos e teorias vêm, ao longo da história, sofrendo influência e, ao mesmo tempo, causando consideráveis mudanças no cenário cultural. Importantes escritores, pintores, filósofos, historiadores, etc, tiveram a sua visão de mundo, de alguma forma, modificada pelo impacto cultural de algumas teorias científicas como a mecânica newtoniana, a teoria da relatividade, a mecânica quântica, ou a teoria da evolução de Darwin, o que sem dúvida, corrobora a ideia de que a ciência/física deve ser vista como cultura (ZANETIC, 1998).

Apesar de o mundo contemporâneo ser, indiscutivelmente, marcado pela presença da atividade científico-tecnológica e de haver uma notável indústria cultural ligada à divulgação científica: documentários, livros, programas educativos; DVDs; museus, etc., é notório também os altos índices de analfabetismo científico, mesmo em países que estão na vanguarda do desenvolvimento científico e tecnológico (DUARTE, 2004). Essa grande contradição é um claro indicio de que a tão atacada e negligenciada escola tem um papel formador que não pode ser substituído por essas formas alternativas de acesso à informação. Parafraçando Poincaré: o conhecimento é feito de informações, assim como uma casa é feita de pedras; contudo, um amontoado de informações não é conhecimento, assim como um monte de pedras não é uma casa.

A educação científica formal não pode, evidentemente, competir, em termos quantitativos, com a profusão de informações científicas e pseudocientíficas lançadas diariamente no mercado; pode, contudo, auxiliar o estudante a utilizá-las criticamente. É fundamentalmente através da educação formal que se pode adquirir conhecimento científico e uma adequada visão do papel da ciência na configuração do mundo moderno.

A história e a filosofia da ciência, ao fornecerem ao professor elementos que permitem explorar a curiosidade epistemológica do estudante ativando o seu ‘metabolismo intelectual’, podem, indiscutivelmente, “tornar as aulas de ciências mais desafiadoras e reflexivas” (MATTEWS, 1995, p. 164).

Convém salientar, no entanto, que não se deve valorizar excessivamente a contribuição da história da ciência no ensino. Apenas a pesquisa no contexto da sala de aula e com materiais históricos

apropriados poderá corroborar ou refutar os argumentos favoráveis ao uso da história da ciência no ensino (PEDUZZI, 2001).

3.3 UMA REFLEXÃO SOBRE A SIMPLIFICAÇÃO E A DEFORMAÇÃO DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA NA EDUCAÇÃO CIENTÍFICA

Embora a história articulada à filosofia da ciência (HFC) venha sendo defendida de forma crescente por uma parcela significativa da comunidade de educadores em ciências, assim como por historiadores, deve-se salientar que há também fortes objeções e advertências quanto à sua utilidade pedagógica tanto na educação básica quanto na superior.

As objeções à história da ciência parecem vir tanto da parte daqueles que a desconhecem e que, por isso a rejeitam, quanto da parte daqueles que, conhecendo a sua complexidade, argumentam ser difícil conciliá-la com uma tradição de ensino calcada em práticas docentes dogmáticas e a-históricas, não obstante os visíveis sinais de esgotamentos dessas práticas.

No que diz respeito à formação de professores e pesquisadores, o ensino das disciplinas científicas tem se limitado aos aspectos teóricos e experimentais, com pouco espaço para a aquisição de referenciais históricos e filosóficos que possam ser articulados à reflexão sobre as suas práticas profissionais. Assim como no início do século XX, ainda se espera atualmente que os estudantes de ciências somente aprendam conteúdos científicos, relegando ao segundo plano as dimensões, históricas, sociais e culturais da ciência (EL HANI, 2006).

Nessa perspectiva, uma das críticas mais frequentes à utilização pedagógica da história da ciência refere-se à forma excessivamente simplificada, ou deformada, como esta vem sendo tradicionalmente apresentada na educação científica através dos livros didáticos e manuais científicos. Este problema foi diagnosticado por Kuhn ao analisar a ciência normal e a educação científica rígida e dogmática a ela associada. Neste tipo de educação, os manuais científicos ao fazerem incursões na história da ciência, fazem-no sempre de forma anacrônica e parcial, procurando ressaltar nas contribuições científicas do passado apenas aqueles aspectos que possam mais facilmente ser ajustado à ciência do presente (KUHN, 1996, p.175).

A aguda análise da ciência e da educação científica empreendida por Kuhn, ao mesmo tempo em que estimulou muitos educadores em ciência a defender o uso da história da ciência na educação científica, também suscitou certa reserva e até mesmo uma postura pessimista da

parte de alguns historiadores da ciência em relação à pertinência da história da ciência no ensino de ciência.

Com o objetivo de explicitar que “entre a intenção e o gesto” existe sempre certa distância, convém examinar alguns desses questionamentos de ordem conceitual, relativos ao uso da história da ciência no ensino de ciência/física. Dessa forma, foram selecionados os posicionamentos e reflexões de três importantes historiadores da ciência: Martin Klein, Stephen Brush e Whitaker, sobre as formas como a história da ciência tem sido tradicionalmente usada no ensino de física e os equívocos cometidos nesta empresa, trazendo para o primeiro plano a questão da compatibilidade entre história e ensino de ciência/física. As objeções e advertências desses historiadores - não obstante o contexto em que foram produzidas - continuam sendo válidas para os dias atuais, tendo em vista que muitos dos problemas apontados por esses autores ainda não foram superados (SILVA; PIMENTEL, 2008; PAGLIARINI, 2007, ALCHIN, 2004).

A tendência que o ensino tradicional de ciência apresenta de distorcer a história da ciência levou o historiador da ciência Martin Klein a sustentar que havia certa incompatibilidade entre um bom ensino de ciências e uma boa história da ciência. Esta posição foi externada por Klein no seminário *History in the Teaching of Physycs*, realizado em 1970, no MIT (EUA), que reunia físicos, educadores em física e historiadores da ciência (MATTEWS, 1995).

Em linhas gerais, Klein argumentou que, na seleção e utilização dos materiais históricos, os professores de ciências, especialmente os de física, seriam norteados por objetivos pedagógicos distintos daqueles que seriam contemplados por um historiador da ciência. Dessa forma, os materiais históricos seriam organizados de forma não histórica e até mesmo a-histórica, o que comprometeria a integridade e a qualidade da história apresentada, resultando em uma pseudo-história (BALDINATO; PORTO, 2007). Além disso, Klein salientou que as perspectivas do físico e do historiador eram distintas e, de certo modo, incompatíveis. Enquanto o historiador busca “a combinação da riqueza de complexidade do fato”, o físico busca “o simples corte agudo do fenômeno” (KLEIN apud MATTEWS, 1995, p. 173).

Em suma os argumentos de Klein apontavam para um fosso intransponível entre história da física e ensino de física. Se a única história possível em um ensino de qualidade é a pseudo-história, então, definitivamente, ela deve ser evitada (MATTHEWS, 1995, p. 173). Segundo Klein: “A história da física não pode ser recortada, selecionada, e moldada com o objetivo de moldá-la a um curso de física,

sem que seja transformada, neste processo, em alguma coisa menos do que história” (KLEIN apud, BALDINATO; PORTO, 2007).

A postura radical de Klein foi muito criticada na época, mas é preciso se ter em conta que a incompatibilidade, a qual ele se refere, está relacionada ao ensino de física ancorado explicita ou implicitamente em concepções científico-pedagógicas de cunho positivista; para este tipo de ensino, não há dúvida, a nova história da ciência é inadequada. Para os dias de hoje, guardado os excessos de purismo historiográfico, pode-se avaliar que a posição de Klein encerra uma questão importante para aqueles que se empenham em levar a história da ciência para a sala de aula, o necessário compromisso entre uma história da ciência de qualidade e um bom ensino de ciência.

Todavia, em sintonia com os argumentos de Matthews (1995), deve-se compreender que, mesmo para um educador em física cuidadoso na escolha ou confecção de materiais históricos que serão inseridos em sala de aula, o seu principal objetivo pedagógico diz respeito à física. Portanto, mesmo não trabalhando com uma história de qualidade duvidosa que, de tão simplificada perca a sua beleza intrínseca, transformando-se em caricatura, ainda assim, os critérios de qualidade do historiador e do educador são distintos. Conforme o momento didático e a maturidade intelectual dos estudantes, o educador pode recorrer a uma “reconstrução histórica” mais simples, porém não falsa, ou uma reconstrução histórica mais sofisticada, suscitante de um quadro interpretativo mais rico e complexo.

No que diz respeito às diferentes perspectivas do físico e do historiador, deve-se reconhecer que, de fato, elas são realmente diferentes. Contudo, a física e a história são espaços de reflexão distintos, porém não desconexos. Como salienta o historiador da ciência Roberto Martins: “[...] geralmente os resultados científicos atualmente aceitos são pouco intuitivos e óbvios, tendo resultado de uma longa evolução e discussão. O ensino dessa evolução facilita a compreensão dos resultados finais e de seu significado” (MARTINS, 1990, p. 4). Não apenas as perspectivas do físico e do historiador são distintas, o próprio físico, enquanto desempenha o papel de professor, pode, em relação a alguns temas, ter uma postura ligeiramente diferente da que teria como pesquisador, tendo em vista que os espaços da pesquisa e do ensino são distintos, porém, não excludentes.

Uma reflexão importante sobre a utilização pedagógica da história da ciência foi feita por Stephen Brush, que participou e foi um dos organizadores dos anais do, já citado, seminário *History in the Teaching of Physycs*. Em 1974 Brush publicou o artigo *Should the*

History of Science be Rated X? Neste trabalho, o autor ironizava o possível choque que a nova imagem de ciência advinda dos trabalhos da nova história da ciência poderia causar em um estudante de ciência, imerso em um contexto científico-pedagógico em que a história era utilizada para reforçar e desenvolver no estudante uma visão de ciência como uma atividade pautada pela racionalidade, imparcialidade, rigor lógico, e metodologia adequada para testar experimentalmente as hipóteses. Logo na primeira página de seu trabalho ele salientava o “caráter subversivo” da nova história da ciência.

Meu interesse neste artigo está relacionado com os possíveis perigos de utilização da história da ciência na educação científica. Examinarei argumentos de que estudantes jovens e impressionáveis no início de suas carreiras deveriam ser protegidos dos escritos de historiadores da ciência contemporâneos [...] esses textos violentam o ideal profissional e a imagem pública dos cientistas como investigadores de mente aberta, racionais, que trabalham metodicamente, guiados seguramente pelo resultado de experimentos controlados e procurando objetivamente pela verdade, seja lá o que isso for (BRUSH, 1974, p. 1164).

Na continuidade de seu esforço reflexivo Brush assinalava que, se o professor tinha como objetivo doutrinar seus alunos para a aceitação do papel tradicional do cientista com um investigador neutro, então os materiais históricos que estavam sendo produzidos pela nova história da ciência não deveriam ser usados. Em seu lugar deveriam ser usados materiais que apresentassem uma história “ficcionalizada”, idealizada. Além disso, se o objetivo pedagógico se reduzia apenas a mostrar como as ideias do passado conduziram as ideias e teorias atuais, então tal objetivo seria plenamente atingido pelo uso de uma história *whigg*. Em contrapartida, numa educação científica em que se procura neutralizar, ou atenuar, o dogmatismo dos textos didáticos e que busca uma melhor compreensão da ciência como uma atividade intelectual na qual as ideias científicas podem sofrer a influência de considerações de ordem metafísicas ou estéticas, o professor poderia encontrar subsídios na nova história da ciência (BRUSH, 1974).

Assim Brush, em sua crítica à educação científica conservadora, salienta que, em uma tradição de ensino calcada em uma visão

positivista de ciência, a história que começara a ganhar expressão na década de 60 era contraproducente, chegando a ser subversiva.

Os argumentos de Klein e Brush são explorados por Whitaker (1979), ao analisar as narrativas históricas, presentes nos manuais de física moderna do ensino universitário. Neste trabalho, ele estabelece uma distinção entre a história simplificada, chamada por Klein de pseudo-história e uma segunda forma de narrativa, à qual ele aplica a expressão quase-história. Na pseudo-história, a complexidade do contexto científico cultural do passado é simplificada ao extremo, passando ao estudante contemporâneo a ideia de um passado ingenuamente simples quando contraposto ao estágio da ciência atual. A quase-história, por sua vez, se constitui em uma versão do desenvolvimento histórico dos conceitos físicos bem mais sofisticada. Ela é, em verdade, uma reconstrução histórica coerente com a lógica de apresentação dos conteúdos, apresentando uma coerência interna que a torna verossímil. Contudo, a quase-história é apenas uma “peça de ficção” a serviço da sequência didática. Sua extensa presença no ensino, segundo Whitaker:

“[...] é o resultado de um grande número de livros cujos autores sentiram a necessidade de dar vida aos registros desses episódios usando um pouco de história, mas que, de fato, acabavam re-escrevendo a história de tal forma que ela segue passo a passo com a física” (WHITAKER, p.1979, p.109).

A quase-história, segundo Whitaker, assemelha-se à “reconstrução racional” da história, nos moldes assinalados por Lakatos, na qual caberia ao historiador suprimir ou desconsiderar todos os aspectos referentes à evolução dos conceitos científicos que pudessem ser considerados “irracionais” à luz de suas concepções filosóficas. Dentro deste espírito, seria legítimo ao historiador, melhorar o seu relato histórico, compondo uma narrativa de como a história da ciência deveria ter se desenvolvido se os cientistas tivessem se comportado racionalmente o tempo inteiro (BALDINATO; PORTO, 2007; ZANETIC, 1989, p. 107).

Todavia, Whitaker avalia que a quase-história não resulta, necessariamente, de um esforço consciente do autor para respaldar a sua visão de ciência, seria antes, consequência de suas preocupações pedagógicas:

Não suponho que autores de quase-história tenham, necessariamente, qualquer intenção filosófica, mesmo que inconsciente. Encaro a quase-história, de modo geral, como simplesmente resultante do desejo por ordem e lógica, conforme conveniente para o processo de ensino e aprendizagem (WHITAKER, 1979, p.238).

Em relação ao conteúdo da citação acima, é importante ressaltar que, embora os pressupostos filosóficos dos autores possam não estar explícitos em suas consciências, os valores e pressupostos epistemológicos da comunidade científica certamente os nortearam na composição de uma reconstrução histórica que estivesse em sintonia com a forma de apresentação dos conteúdos científicos presentes nos livros textos.

Whitaker chega a admitir que a reconstrução racional da história pode ser útil no ensino de ciências, desde que o estudante seja avisado sobre o que está ocorrendo. Para ele, o grande problema da quase-história é que esta não admite que a reconstrução foi feita.

Embora a reconstrução racional da história não seja aqui defendida, avalia-se que o fato dela assumir o seu caráter, a princípio, a torna menos danosa para o estudante e o professor do que a quase-história. A assimilação da quase-história, como se fora história, pelo professor e pelo aluno é um dos fatores responsáveis pela presença de concepções equivocadas sobre a natureza da ciência, presente entre estudantes e professores universitários de ciência. Para muitos, a quase-história é, de fato, a história.

Entretanto, deve-se observar que, em sua ação didática, de alguma forma, o professor pode incorrer em uma reconstrução histórica que, aos olhos críticos do historiador, seja vista como uma pseudo ou quase-história. Um exemplo, ao reconstruir historicamente em sala de aula uma demonstração matemática associada a um certo tema científico, o professor poderá, em nome da funcionalidade didática, optar pela linguagem matemática atual, tendo em vista que é esta linguagem que o estudante precisa dominar. A demonstração na linguagem antiga pode, do ponto de vista histórico e intelectual, ser muito interessante e instrutiva, como assinala Koyré (1991, p.13), contudo, cabe ao professor compatibilizar a sua reconstrução histórica

com o tempo didático e os objetivos da disciplina, o que não implica, necessariamente, em uma história de má qualidade.

Assim, embora a quase-história, como um todo, deva ser evitada, é presumível supor que, em algum momento da ação didática, algumas concessões terão que ser feitas pelo professor. Ter clareza da relação custo-benefício desses recortes e explicitá-los para os estudantes parece ser uma boa estratégia intelectual e pedagógica.

Retornando ao artigo de Whitaker, que toma como referência o trabalho de Planck sobre a radiação do corpo negro e a teoria do efeito fotoelétrico de Einstein, ele assinala que uma grave deformação da história da ciência promovida pela quase-história é a desconsideração dos aspectos ligados à interação social entre os cientistas e a dimensão social mais ampla do trabalho científico, o que, segundo ele, induz a ideias equivocadas sobre a gênese das ideias científicas, passando a impressão de que a descoberta de novos conceitos são triviais, ou surgem através de lampejos quase místicos. A quase história desconsidera, ainda, o tempo de maturação que os novos conceitos precisam ter na comunidade científica até serem aceitos de forma consensual pelos seus membros.

Trazendo à discussão para o contexto dos últimos anos, percebe-se que, em relação aos manuais universitários, a forma de apresentação da história da ciência não se alterou. Em relação ao nível médio, trabalhos recentes revelam que, apesar das recomendações do PCN e das periódicas avaliações dos livros didáticos feitas pelo PNLEM, na maioria dos livros didáticos de física, a presença da história da ciência se dá de forma extremamente simplificada, com erros historiográficos e distantes dos conhecimentos epistemológicos atuais, reduzindo-se a história da ciência a grandes personagens, datas marcantes e anedotas, reproduzindo muitas vezes concepções equivocadas sobre a dinâmica da atividade científica (PENA; RIBEIRO FILHO, 2009; SILVA; PIMENTEL, 2008; PAGLIARINI, 2007; MARTINS, 2006).

Este diagnóstico reforça a necessidade de se oferecer aos estudantes de graduação uma formação histórico-epistemológica adequada e fomentar a partir dos cursos de graduação uma nova cultura de reflexão e prática docente em relação à abordagem dos conteúdos científicos.

Nessa perspectiva, avalia-se que as reflexões de Klein, Brush e Whitaker longe de inviabilizarem o uso da história da ciência no ensino universitário, explicitam as armadilhas e cuidados que se deve ter na manutenção um adequado equilíbrio entre uma boa história e um bom ensino. Entendendo-se aqui por bom ensino aquele que estimule uma

reflexão epistemológica sobre os conteúdos científicos apreendidos e desenvolva no estudante um espírito crítico acerca do papel da ciência na configuração do mundo contemporâneo.

3.4 A AUSÊNCIA DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA NO ENSINO DE FÍSICA À LUZ DA TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA

Historicamente o processo de inserção do saber científico na educação formal envolveu um delicado compromisso entre a visão de ciência, os valores e atitudes da comunidade científica e as exigências ditadas pela necessidade de didatização deste saber. Assim, sob a forma de saber a ensinar, surgiu um saber que tem um caráter híbrido, ao mesmo tempo em que guarda em si características importantes do saber que lhe deu origem, se distingue deste, uma vez que neste novo patamar adquire novos atributos.

Pois a escola nunca ensinou saberes (“em estado puro”, é o que desejaria dizer), mas sim conteúdos de ensino que resultam de cruzamentos complexos entre uma lógica conceitual, um projeto de formação e exigências didáticas. Deste ponto de vista, as transformações sofridas na escola pelo saber sábio devem ser interpretadas menos em termos de desvio ou degradação sempre em geração [...] de que em termos de necessidade constitutiva, devendo ser analisada como tal. Pois reunindo um currículo, todo conceito científico se integra numa nova economia do saber: ele deve designar alguma coisa que possa ser aprendida [...], deve abrir um campo de exercícios para a produção ou permitir conceber sessões de trabalhos práticos... E também características e exigências que não existiam no contexto do saber sábio (ASTOLFI; DEVELAY, 2008, p.51,52).

As tensões entre ‘mudanças e permanências’ que caracterizam a ‘fabricação’ do saber a ensinar estão materializadas no texto do saber – o manual de ensino. Na textualização do saber a ensinar, os processos de despersonalização, descontextualização e dessincretização atuam no sentido de criar uma sequência didática dogmática e a-histórica, na qual os conteúdos são apresentados, segundo uma estrutura linear e cumulativa que valoriza apenas os produtos da atividade científica.

Ora, não se deve perder de vista que esses processos foram desenvolvidos no âmbito da comunidade científica e atuaram na textualização do saber sábio de distintas maneiras ao longo do desenvolvimento da ciência moderna, traduzindo o crescente esforço dos cientistas, em apresentar aos pares um texto científico na qual, os momentos de incerteza, os atalhos e as peculiaridades do contexto da descoberta não estivessem presentes (CHEVALLARD, 2005, p.24 PIETROCOLA, PINHO ALVES; PINHEIRO, 2003).

Nos textos científicos do século XVII e início do século XVIII pode-se encontrar uma forma de textualização do saber sábio que não já não era comum em fins do século XIX. Por exemplo, nos textos de Kepler embora se perceba um intenso diálogo crítico entre as suas concepções teóricas e os dados observacionais coletados por Tycho Brahe, percebe-se também uma forte presença de considerações de caráter estético e metafísico (KOYRÉ, 1991, p. 86-90). Algumas das obras de Galileu podem ser lidas como se fossem textos literários - de fato, ele escrevia para um público culto não especializado (KOYRÉ, 1991, p. 259-270). O pensamento de Newton, apesar da intensa valorização do método experimental e do formalismo matemático, é especialmente marcado por aspectos de natureza mística e religiosa, que influenciaram as suas concepções sobre o espaço absoluto e a sua teoria da gravitação (ABRANTES, 1998, p. 79-84). Em contrapartida, vários dos físicos matemáticos envolvidos no trabalho de articulação do paradigma newtoniano, entre eles Euler, os Bernoulli, d'Alembert, Laplace e Clairaut, se empenharam em excluir da física newtoniana os aspectos considerados "metafísicos" do pensamento de Newton (ABRANTES, 1998, p.146).

Esses exemplos sinalizam como a despersonalização, a descontextualização e a dessincretização - hoje marcas distintivas dos artigos científicos e manuais de ensino - foram historicamente construídas e, lentamente, integradas à textualização do saber científico, a partir da própria intencionalidade da comunidade científica de construir uma forma de investigação da natureza cujos resultados, ou melhor, cujos critérios de validação dos conhecimentos elaborados, fossem, ao menos formalmente, isentos de considerações metafísicas, estéticas ou religiosas, que pudessem ter atuado no contexto da descoberta.

Um belo contraste entre duas formas totalmente distintas de textualização do saber científico é fornecida por Maxwell em um comentário sobre os trabalhos experimentais de dois importantes cientistas da primeira metade do século XIX, Ampère e Faraday.

O método de Ampère, contudo, embora formalizado numa forma indutiva, não nos permite traçar a formação das idéias que o orientaram. Dificilmente podemos acreditar que Ampère realmente descobriu a lei da ação da maneira como a descreve. Somos levados a suspeitar, o que na verdade nos diz ele próprio, que descobriu a lei por algum processo que não tinha nos mostrado, e que quando posteriormente construir uma demonstração perfeita, removeu todos os traços da plataforma com a qual a havia feito crescer.

Faraday, por outro modo, mostra-nos seus experimentos mal sucedidos tanto quanto os bem sucedidos, e suas idéias triviais, tanto quanto as desenvolvidas, e o leitor, apesar de inferior a ele no poder de intuição, sente simpatia mesmo mais que admiração, e é tentado a acreditar que se tivesse oportunidade também seria um descobridor. Conseqüentemente, todo estudante deveria ler as pesquisas de Ampère como um exemplo esplêndido de estilo científico na apresentação de uma descoberta, mas deveria também estudar Faraday para a formação de um espírito, por meio da ação e reação que ocorrerá entre os fatos recentemente descobertos como apresentados a eles por Faraday e as idéias começando a crescer na sua própria cabeça (MAXWELL, apud, ALMEIDA, 2004 p.102).

Este comentário de Maxwell, sem dúvida, exemplifica para estudantes e professores o prazer intelectual e o caráter instrutivo e educativo que podem advir do contato direto com alguns trabalhos originais da história da ciência.

Reportando-se agora ao saber a ensinar, tem-se que a educação científica em nível universitário é o espaço da educação formal em que de fato ocorre uma efetiva transformação do saber legitimado pela comunidade científica – o saber sábio - em saber a ensinar articulável à formação profissional das futuras gerações de docentes e pesquisadores. Apesar da virtual proximidade entre ensino e pesquisa, uma vez que, normalmente os pesquisadores também são professores, deve-se assinalar que esses espaços são distintos, de forma que existe uma

relativa distância entre o saber produzido no âmbito da pesquisa acadêmica e o saber anunciado nas ementas e desenvolvido nos manuais científicos.

Em linhas gerais, os conteúdos científicos presentes nas diferentes disciplinas que compõem o currículo de graduação de um curso de física são saberes a ensinar advindos de saberes científicos já bem estabelecidos na comunidade científica. Há décadas que os tradicionais manuais de ensino se reproduzem tomando como referência os manuais mais antigos que fizeram as primeiras transposições do saber sábio (SILVA, 2006; DIAS, V. 2004; PINHO ALVES, 2000).

Ao longo do tempo, um dos efeitos dessas sucessivas transposições didáticas indiretas é o reforço da distância entre o saber a ensinar, presente no manual, e o saber sábio que lhe deu origem; um outro, intimamente relacionado com este, é o esquecimento dessa distância nas consciências dos professores, promovendo uma fictícia e feliz identidade entre os dois níveis de saber. Em termos práticos, o manual deixa de ser um guia de acesso ao conhecimento científico, e passa a ser “o conhecimento científico”. A explicitação da diferença entre esses saberes, feita pela Transposição Didática é, de certo modo, desconfortável para o docente (CHEVALLARD, 2005, p. 16-21).

A forma pela qual os saberes a ensinar estão materializados nos manuais científicos não permite ao estudante vislumbrar o conhecimento científico, enquanto construção humana, marcada por incertezas, controvérsias, erros e acertos, que demandaram da comunidade científica um considerável esforço intelectual para a sua gênese, compreensão e aceitação.

Todavia, a ausência ou a presença distorcida da história da ciência nos manuais de ensino, não pode se atribuída apenas à invenção de objetos didáticos, associada à formatação do saber a ensinar. É preciso ter-se em conta que na própria esfera do saber sábio, a história da ciência só adquiriu o status de disciplina autônoma de reflexão sobre o saber científico, ao longo do século XX. Nos séculos anteriores, em geral, ou a história da ciência era ignorada pelos cientistas ou usada como ferramenta ideológica em defesa da nova forma de investigação da natureza, que começa a ganhar forma entre os séculos XVI e XVII (ALFONSO-GOLDFARB, 2004; MARTINS, 2001).

Muitas vezes a deformação da história da ciência, é promovida pelos próprios cientistas que veem, ou pretendem que os outros vejam no trabalho de alguns de seus antecessores uma antecipação de suas próprias ideias. Um exemplo:

Newton escreveu que Galileu descobriu que a força constante da gravidade produz um movimento proporcional ao quadrado do tempo. De fato, o teorema cinemático de Galileu realmente toma essa forma quando inserido na matriz dos próprios conceitos dinâmicos de Newton. Mas Galileu não afirmou nada desse gênero. Sua discussão a respeito da queda dos corpos raramente alude a forças e muito menos a uma força gravitacional (KUHN, 1996, p. 177).

A análise kuhniana da história da ciência revela que os cientistas tendem a ver o passado de sua disciplina como “um desenvolvimento linear em direção ao ponto de vista privilegiado do presente”, além de serem especialmente suscetíveis à tentação de reescrever a história, sob essa perspectiva. “A depreciação dos fatos históricos está profunda e provavelmente funcionalmente enraizada na ideologia da profissão científica” (KUHN, 1996, p.176).

Ora, os atuais manuais de ensino presentes no ensino superior são herdeiros da tradição dos manuais científicos que ganha expressão no século XIX. Apesar das inúmeras inovações gráficas e da agregação de novos conteúdos, a visão de ciência presente nesses manuais é de cunho empírico-indutivista e a visão de história que eles propagam é linear e cumulativa (MOREIRA; MASSONI; OSTERMANN, 2007, ASTOLFI; DEVELAY, 2008, p. 50-51).

Assim, ao contrário dos argumentos de Whitaker (1979), apresentados na seção anterior, de que a quase-história seria fruto apenas da intencionalidade didática dos autores de manuais de física moderna, a epistemologia histórica de Kuhn e a teoria da transposição didática evidenciam que os valores e a visão de ciência desses autores cientistas estão materializados nesses e em outros manuais.

É interessante observar que as principais objeções ao uso da história da ciência na educação científica, têm como pano de fundo a percepção de que ela é incompatível com a tradição de ensino dogmática e a-histórica estabelecida. E realmente é. A compreensão desta tradição, à luz da análise fornecida pela Transposição Didática, constitui-se em um primeiro passo no sentido de minimizar e até subverter os seus efeitos indesejáveis. É preciso levar-se em conta que visão epistemológica do conhecimento científico norteadora do processo tradicional de transposição didática encontra-se superada. De modo que uma visão epistemológica mais adequada do saber científico pode e

deve ser articulada ao desenvolvimento de novas formas de veiculá-lo no ensino de ciência/física.

Nesse sentido a história da ciência constitui-se em um componente indispensável à formação do professor, fornecendo-lhe ferramentas culturais úteis à revitalização do saber a ensinar e do saber ensinado. A “vigilância epistemológica” sobre os processos de transformação do saber (CHEVALLARD, 2005), ganha um significativo aporte conceitual das reflexões contemporâneas advindas da história e filosofia da ciência.

O cenário histórico atual parece ser propício a um reexame das práticas pedagógicas associadas ao tradicional processo de transposição didática. Apesar do uso acrítico dos manuais ainda ser hegemônicos no ensino de graduação (PIETROCOLLA, PINHO ALVES; PINHEIRO, 2003; MOREIRA, 2000) é crescente também a percepção de que ele é insuficiente para lidar com as demandas de um contexto sócio-histórico-cultural que clama por uma educação científica, em todos os níveis, mais atenta à compreensão e ao enfrentamento dos problemas que afligem à sociedade contemporânea, conforme sinalizado nos documentos oficiais ligados à educação (BRASIL, 2002; 2001; 1999; 1997).

É claro que a física, em suas distintas disciplinas, tem uma especificidade, um formalismo teórico e experimental que de forma alguma podem ser dispensados, e nem é isto o que se pretende. Contudo, mesmo sob o aspecto de compreensão do próprio conteúdo científico a história da ciência pode ser útil, clarificando os conceitos, explicitando a funcionalidade e os limites dos modelos utilizados na apreensão da complexidade do fenômeno real (BATISTA 2007).

A história da ciência no âmbito da formação universitária pode se constituir em um espaço cultural privilegiado a um reexame crítico da construção do conhecimento científico; revitalizando o desgaste sofrido pelos conteúdos científicos em um ensino que lhes tem conferido um caráter meramente utilitário. A história da ciência pode tornar a relação ternária professor-aluno-saber uma atividade intelectual altamente estimulante e gratificante, pois:

[...]. Ela nos revela o espírito humano no que ele tem de mais alto, em sua busca incessante, sempre insatisfeita e sempre renovada, de um objetivo sempre lhe escapa: a busca da verdade [...]. O caminho na direção da verdade é cheio de ciladas e semeado de erros e nele os fracassos são mais

frequentes do que os sucessos. Fracassos, de resto, por vezes tão reveladores e instrutivos quanto os êxitos. Assim, cometeríamos um engano se desprezásemos o estudo dos erros; é através deles que o espírito progride em direção à verdade (KOYRÉ, 1991, p.377).

Nesse sentido, a história da ciência se converte em um instrumento de subversão do caráter dogmático e fechado dos textos científicos que comandam o desenvolvimento didático das disciplinas científicas, limitando uma compreensão mais ampla do saber científico.

3.5 A GÊNESE DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL O SEU POTENCIAL EDUCATIVO E O SEU USO DIDÁTICO

A síntese newtoniana, formalizada com a lei da gravitação universal, promoveu de forma bem sucedida a unificação de duas físicas que durante séculos foram pensadas como distintas e independentes: a física celeste e a física dos corpos terrestres. Com a síntese newtoniana o modelo heliocêntrico, introduzido por Copérnico, finalmente ganha uma teoria física que lhe dá suporte. Mais do que um notável avanço científico, a síntese newtoniana representou o coroamento de um intenso processo de mudança cultural, de visão de mundo, cujas origens são anteriores à própria hipótese copernicana de uma Terra móvel.

Apesar do imenso significado científico, histórico e filosófico da síntese newtoniana, dando ao homem a clara percepção de que o universo podia ser racionalmente explicado, percebe-se que nos cursos de física geral a gravitação newtoniana é relegada a um segundo plano aparecendo, normalmente, como um dos últimos tópicos de um curso de mecânica em nível básico. Nos livros texto, em geral, a lei da gravitação universal aparece como um mero enunciado, sem nenhuma reflexão acerca dos obstáculos epistemológicos e científicos à sua aceitação. A extensão das leis do movimento terrestre para o espaço celeste aparece como se fosse algo trivial, o papel do sistema copernicano como o grande motor para esta síntese é negligenciado.

A gravitação universal pelo fato de permitir uma articulação de diversos conteúdos do curso de mecânica (movimentos curvilíneos, as leis do movimento, a conservação do momento linear), além de ser o coroamento de um complexo processo histórico, cuja ciência moderna é “ao mesmo tempo raiz e fruto” (KOYRÉ, 1991, p.5) é um tema de grande potencial educativo a ser explorado em um enfoque histórico

filosófico, permitindo uma reflexão científica e filosófica acerca de aspectos fundamentais do conteúdo científicos e dos aspectos culturais e sociais associados ao desenvolvimento desses conteúdos.

Contudo, a despeito do tema ser especialmente convidativo e propício a uma abordagem histórico-filosófica, o que, sem dúvida, lhe proporcionaria um rejuvenescimento didático, o exame de alguns periódicos ligados ao ensino de física (FÍSICA NA ESCOLA, REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA, CADERNO BRASILEIRO DE ENSINO DE FÍSICA, CIÊNCIA&EDUCAÇÃO E SCIENCE&EDUCATION), revela que, no período compreendido entre 2000 e agosto de 2009, apenas quatro trabalhos acadêmicos se voltaram para uma abordagem histórico-filosófica da gravitação universal com a finalidade de subsidiar, propor estratégias de ação docente, ou relatar os resultados de intervenções didáticas. Isto fornece indícios de que a exploração do tema pode fornecer boas contribuições a inserção da história da ciência em sala de aula.

Freire Jr, Matos Filho e Vale (2004) exploram a proposição IV do livro III dos *Principia* na qual Newton argumenta que é a força da gravidade que continuamente retira a Lua de um movimento retilíneo, reconduzindo-a à sua órbita. É salientado que é nesta proposição que pela primeira vez se expressa o que hoje se conhece por síntese newtoniana, isto é, a ideia de que a física que preside o movimento dos corpos celestes é a mesma que explica o movimento dos corpos na Terra. Esta proposição, segundo os autores, “pode e deveria ser introduzida nos cursos de Licenciatura em Física e no ensino de Física no Ensino Médio”. Dentro deste espírito, eles recorrem a diferentes traduções inglesas dos *Principia*, e se apoiam em estudos críticos de importantes historiadores da ciência, além de textos de educadores em ciência sobre o uso da história da ciência em sala de aula.

Os autores reproduzem a proposição IV, na qual Newton expõe de forma sucinta as linhas gerais de sua demonstração. A seguir é comentada a estrutura geral dos três livros que compõem os *Principia*. É salientada a cuidadosa exposição de Newton, que já no Livro I desenvolve alguns dos argumentos que dariam suporte à sua demonstração no livro III, de certo modo, antevendo algumas das objeções que seriam feitas por seus contemporâneos a assunção de que a força que mantém a Lua em órbita é da mesma natureza daquela que faz uma pedra cair.

Em seu trabalho de reconstrução didática, os autores procuram se manter fiéis ao argumento original apresentado nos *Principia*, evitando inclusive usar a notação moderna, o que facilitaria a leitura, mas que, de

certo modo, retiraria um pouco do encanto da demonstração newtoniana. Já na reconstrução destinada ao Ensino Médio os autores lançam mão da linguagem matemática atual, bem como utilizam o sistema internacional de unidades.

Em essência a demonstração newtoniana não é difícil. Contudo, o rigoroso estilo da argumentação que remete o leitor para várias demonstrações e regras precedentes, os termos técnicos e as unidades da época, bem como a técnica de apresentação das demonstrações matemáticas, tornam a compreensão do texto original difícil para o leitor contemporâneo. Isto evidencia a dificuldade de se levar para a sala de aula originais de pesquisa, sem um prévio estudo desses originais e o apoio de materiais historiográficos e de educação científica escritos por estudiosos do tema. O trabalho empreendido pelos autores se constitui um bom ponto de partida para a inserção deste tema em sala de aula, seja em um curso de graduação em Física, ou no Ensino Médio.

É importante salientar que, normalmente, nas transposições didáticas presentes nos manuais de ensino, embora possa estar presente a expressão “síntese newtoniana”, nenhuma reflexão histórico-epistemológica sobre a unificação das físicas do céu e da Terra é feita. Com isso a ruptura promovida pela síntese newtoniana desaparece, ou como argumenta Kuhn, um dos efeitos dos manuais sobre a história da ciência é a invisibilidade das revoluções científicas (KUHN, 1996, p. 173-181). Dessa forma, para que o professor e o estudante possam, de fato, sorver a beleza intrínseca da “mais emocionante demonstração dos Principia”, faz-se necessário um trabalho prévio de “preparação espiritual”, através de uma adequada reconstrução histórico-filosófica da evolução das ideias que prepararam o espírito humano para a emergência da síntese newtoniana.

Dias, Santos e Souza (2004), exploram a temática da Gravitação Universal, através de um texto didático em que as autoras propõem uma forma alternativa de apresentar o conceito de Gravitação ao aluno do Ensino Médio. Para tal intento recorrem à História da Física. Assim, apresentam, de forma sintética, uma reconstrução histórica das principais ideias sobre o movimento, desde a Antiguidade Clássica, até a emergência da gravitação universal apresentada por Newton nos *Principia*. É importante salientar que nesta reconstrução as autoras, apoiando-se em estudos de Bernard Cohen, refutam as narrativas didáticas do episódio da maçã, que atribuem à gênese da gravitação universal a este controverso episódio, conferindo-lhe um caráter mágico, quase mitológico.

Com base na Teoria da Aprendizagem Significativa, de David Ausubel, as autoras defendem a ideia de que a História da Física pode ser integrada ao processo de ensino-aprendizagem, desempenhando a função de organizadores prévios.

De acordo com as autoras, foi apresentado a duas turmas de 3º ano do Ensino Médio um questionário, com o objetivo de detectar os subsunçores. A partir deste diagnóstico foi elaborado o material instrucional. Os conceitos apresentados no enfoque histórico atuam como organizadores prévios de forma a articular os subsunçores aos novos conceitos e definições que seriam apresentados formalmente segundo o enfoque tradicional. Os resultados preliminares desta implementação didática são apresentados, sendo destacada a necessidade de estudos adicionais sobre a proposta de uso de temas da história da ciência como organizadores prévios.

Teodoro, Nardi e Silva (2004), com base em um trabalho anterior (TEODORO, 2000) relatam as linhas gerais do desenvolvimento de uma pesquisa em que buscam evidenciar como a “evolução histórica dos modelos de atração entre corpos tendo como pano de fundo a evolução dos modelos de mundo” pode subsidiar a formação inicial do docente de Física. Nessa perspectiva, desenvolvem, no âmbito da disciplina de Prática de Ensino de Física, uma proposta de curso em que procuram integrar “os resultados de pesquisas recentes sobre os processos de ensino e aprendizagem em Ciências, sobre as concepções alternativas e sobre a utilização da História da Ciência no ensino de Ciências”. Os textos históricos utilizados foram selecionados da literatura sobre o tema e exploram um amplo espectro da evolução das ideias explicativas do mundo na cultura ocidental, passando por pensadores como Aristóteles, Ptolomeu, Copérnico, Galileu, entre outros, culminando com a síntese newtoniana.

Boulos (2006) assim com Freire Jr et al. (2004) também explora o argumento de Newton para a construção de sua teoria da gravitação universal, presente no livro III, proposição IV. Contudo, antes desta examina as proposições anteriores nas quais Newton estabelece que: (1) os Satélites de Júpiter e de Saturno são mantidas em suas respectivas órbitas em torno desses planetas por uma força que é dirigida para o planeta e é inversamente proporcional ao quadrado da distância deste ao satélite; (2) cada planeta é mantido em sua órbita em torno do Sol por uma força centrípeta inversamente proporcional ao quadrado da distância do planeta ao Sol e direcionada para o centro deste; (3) A Lua é mantida em sua órbita ao redor da Terra por uma força centrípeta inversamente proporcional ao quadrado de sua distância ao centro da

Terra e apontando para o centro desta. Assim, com este expediente Newton, de certa forma, prepara o espírito do leitor para o salto epistemológico que se produz a partir da proposição IV.

O autor reconstrói o cálculo atinente ao “teste da Lua”, e estende a sua reflexão ao exame das Proposições V, VI e VII. É salientado que o argumento de Newton para a Gravitação Universal faz uso de suas deduções dos fenômenos e que estas não se encerram na Proposição VII, mas abrangem todo o livro III. Todavia, avalia que “o motor do argumento” se encontra no “teste da Lua”, abordado nas Proposições III e IV, e na proporcionalidade entre as massas gravitacional e inercial, presente na Proposição VI. Em ambos o papel do pêndulo é crucial. Finalizando a sua reflexão, Boulos resume a importância histórica, epistemológica e científica do pêndulo na unificação das físicas da Terra e do Cosmos com uma citação de Westfall: “sem o pêndulo, não haveria os *Principia*”.

Fora do âmbito dos periódicos pesquisados, Martins (2006), apoiando-se em documentos históricos (cartas, cadernos de anotações e relatos de contemporâneos), empreende uma reflexão crítica acerca do controvertido episódio da queda da maçã observada por Newton em sua juventude e que, supostamente, teria desencadeado os seus estudos sobre a gravitação.

A incorporação acrítica desse episódio à cultura científica contemporânea, normalmente presentes nos manuais de ensino e textos de divulgação científica sob a forma de anedota, é criticada pelo autor. Para exemplificar alguns dos equívocos e distorções históricas presentes na educação científica, são apresentados e comentados trechos de três manuais destinados ao treinamento de professores em que a anedota da maçã é utilizada com propósitos, supostamente, didáticos.

Para fundamentar a sua crítica a esses manuais é empreendida uma breve reflexão sobre o significado da palavra gravidade desde a Antiguidade até a época de Newton. Assim, são refutadas algumas ideias equivocadas presentes nesses textos tais como: a de que a partir da observação da queda da maçã Newton teria descoberto a gravidade, teria inventado esta palavra, ou ainda, que ele teria descoberto a causa da gravidade.

Contudo, apesar dos equívocos e erros presentes nessas versões didáticas da anedota da maçã, e da veracidade desse episódio ser questionada por alguns autores, antigos e modernos, o autor procura analisar até que ponto ele possui fundamento histórico. Ao que parece, Newton não deixou nenhum registro escrito sobre este episódio, mas o teria relatado a alguns de seus amigos que o teriam registrado e

divulgado. Com o correr dos anos essa história ganharia novas versões com acréscimos e distorções.

Assim, partindo do princípio de que Newton poderia de fato ter observado a queda da maçã o autor procura evidências de como ele pensava sobre a gravidade em sua juventude. Em tal intento chama a atenção para o contexto científico-cultural no qual estava imerso o jovem Newton, destacando que os seus cadernos de anotação fornecem um forte testemunho de que ele foi um profundo estudioso dos trabalhos de Galileu, Descartes, Kepler e More, entre outros. Dessa forma, o autor procura deixar claro que as primeiras ideias de Newton sobre a gravidade e o movimento dos astros não surgiram a partir da queda da maçã, mas sim mediante a sua paciente e criativa interação com os trabalhos de seus predecessores e contemporâneos.

A seguir o autor procura reconstruir a demonstração feita por Newton de que o movimento da Lua em torno da Terra poderia ser explicado, a partir do cálculo de uma hipotética queda da Lua ao longo de sua órbita, no intervalo de tempo de um minuto, seguido pelo confronto deste resultado, com aquele obtido para a ‘queda da Lua’ nas proximidades da superfície terrestre, no intervalo de tempo de um segundo.

É salientado que o método usado por Newton em sua juventude é “bastante indireto e difícil de explicar”, o que leva o autor a optar por uma versão mais simples dessa demonstração apresentada por Newton nos *Principia* (livro III, proposição IV).

É comentado que, à época do cálculo da queda da Lua, Newton começou a pensar que o Sol, como a Terra, deveria ter um tipo de gravidade, associada ao éter puxado e condensado dentro do Sol, e que esta seria responsável pelo movimento dos planetas. Com o auxílio da 3ª lei de Kepler, teria demonstrado que a força que mantém um planeta em órbita deve ser inversamente proporcional ao quadrado de sua distância média ao Sol.

Segundo o autor, não há indicações de que Newton em sua juventude tenha pensado que todos os corpos se atraem com forças proporcionais ao produto de suas massas e inversamente proporcionais ao quadrado de suas distâncias; o que ele pensou em 1666, não equivale ainda à teoria da gravitação universal, que se desenvolveu lentamente em seu espírito nas décadas seguintes.

O artigo não tem como objetivo uma reconstrução histórico-epistemológica do complexo processo de construção da teoria da gravitação universal, nem a sugestão de estratégias didáticas para a abordagem do tema em sala de aula. Contudo, aborda um episódio

histórico, ou pseudo-histórico interessante, pois tem reforçado um uso inadequado da história da ciência em sala de aula. Neste sentido, o trabalho fornece importantes subsídios culturais ao professor interessado em minimizar os efeitos nocivos da transposição didática tradicional, em que a história da ciência aparece de forma equivocada e distorcida.

Finalizando a seção, é importante assinalar que o pequeno número de trabalhos encontrados fornece indícios de que a gênese da gravitação universal é uma temática cuja exploração, sob um enfoque histórico-epistemológico, ainda não foi convenientemente efetuada, sinalizando que trabalhos nesta vertente podem fornecer boas contribuições ao esforço intelectual de articulação da história e filosofia da ciência à confecção de novas práticas pedagógicas – docentes e discentes.

4 A GÊNESE DA TEORIA DA GRAVITAÇÃO NEWTONIANA

4.1 INTRODUÇÃO

A gravitação é uma das forças fundamentais da natureza e historicamente foi a primeira a ser, conceitual e matematicamente, formulada em fins do século XVII. O corpo teórico que subsidia sua formulação, bem como a sua aplicação aos problemas do movimento celeste, encontra-se na obra *Principia* que representou uma grande síntese de todo um conjunto de transformações no estudo da natureza que se iniciam ainda no Renascimento, e que ganham com a obra astronômica de Copérnico a sua primeira grande expressão teórica, sinalizando para muitos pensadores uma promessa e ao mesmo tempo novos problemas e questões, cujos esforços de resolução conduziriam à construção de uma nova física do movimento e à superação dos limites impostos pela cosmologia aristotélica (KUHN, 1996; COHEN, 1988).

A gênese da teoria da gravitação está indissociavelmente ligada ao desenvolvimento da astronomia copernicana, consideravelmente ampliada e aperfeiçoada por Kepler, e à engenhosidade das ideias e métodos advindos da “nova ciência” do movimento, que tem em Galileu um de seus expoentes. De fato, ao longo do século XVII, as controvérsias geradas pelo modelo copernicano foram um dos elementos que fermentaram as atividades intelectuais dos construtores da chamada Revolução Científica (KUHN, 1990, p. 20).

Ao articular, com notável precisão, as técnicas e conceitos da física terrestre à explicação do movimento planetário Newton conseguiu unificar a física de dois mundos que durante séculos foram concebidos como espaços com propriedades distintas, o mundo sublunar onde predominava a corrupção, a mudança e o mundo supralunar, o mundo perfeito e imutável, como o criador (KOYRÉ, 1991).

A partir da síntese newtoniana as leis da física passam a ser as mesmas em todo o universo. O cosmos aristotélico, símbolo de uma imagem de ciência e de natureza, é definitivamente superado. As consequências que adviriam dessa revolução científica, concluindo a que se iniciara com Copérnico, não se restringiriam de forma alguma ao círculo restrito dos filósofos naturais. Ao longo dos séculos XVIII e XIX, a mecânica newtoniana, seria o grande modelo de ciência, inspirando o desenvolvimento de outros ramos da física (eletricidade, magnetismo e calor), bem como movimentos filosóficos e políticos que aspiravam organizar a sociedade, segundo os princípios de uma racionalidade científica. (ABRANTES, 1998).

Neste capítulo desenvolve-se uma reconstrução histórico-filosófica acerca do processo de produção e transformação das ideias científicas que, a partir da emergência da teoria heliocêntrica de Copérnico, produziu as condições científicas, filosóficas e culturais, que permitiram a Newton empreender a chamada revolução newtoniana que, não obstante a imensa contribuição de Newton, que em muito superou os seus predecessores, foi uma construção intelectual coletiva. Esta revolução se configurou como a síntese dos esforços de várias gerações de cientistas antecessores de Newton, e influenciou de forma decisiva as gerações de pensadores e filósofos naturais que o sucederam (COHEN, 1983).

A história da ciência revela que este processo de mudança científica está imerso em um amplo processo de mudança espiritual (KOYRÉ, 1991), e não se reduz a uma abordagem meramente linear e cumulativa.

Estudar e compreender alguns aspectos da complexidade histórico-epistemológica da gênese da gravitação universal e levar os frutos dessa reflexão aos estudantes de física em nível de graduação é o objetivo da reflexão aqui iniciada.

4.2 COPÉRNICO E O DESENVOLVIMENTO DE SUA CONCEPÇÃO HELIOCÊNTRICA

Por volta de 1510, uma década após a chegada de Cabral ao Brasil, Nicolau Copérnico (1473-1543) divulga, para um restrito grupo de leitores, um opúsculo de oito folhas, escritas em frente e verso, em que pela primeira vez, desde a Antiguidade, se esboça a ideia de uma teoria astronômica que tira a Terra do centro do universo, transformando-a em, apenas, um planeta que, juntamente com os demais, gira em torno do Sol.

A pequena obra intitulava-se *Commentariolus*: Pequeno comentário de Nicolau Copérnico sobre suas próprias hipóteses acerca dos movimentos celestes (*Nicolai Copernici de hypothesibus motuum caelestium a se constitutis commentariolus*). Nela, Copérnico expõe, pela primeira vez, as ideias básicas de sua teoria heliocêntrica.

Copérnico inicia esse pequeno livro situando as dificuldades enfrentadas pelos astrônomos, ao longo da história, para explicar o movimento dos planetas de acordo com o princípio da circularidade. Aponta as limitações da solução dada por Eudoxo de Cnido (390-338 a.C) e Calipo de Cízico (370-300 a.C), que tentaram resolver o problema com o modelo das esferas concêntricas. Neste modelo o

movimento de cada astro era concebido como resultante da rotação simultânea de um conjunto de esferas concêntricas à Terra; sendo que cada esfera girava uniformemente em torno de um eixo afixado à esfera seguinte. Explícita que os artifícios dos excêntricos e epiciclos, usados na astronomia ptolomaica, também se mostravam insuficientes.

Todavia, aquilo que foi transmitido por Ptolomeu e muitos outros aqui e ali sobre isso, embora correspondesse aos dados numéricos, também parecia produzir dúvidas que não eram pequenas. Pois isso não era suficiente a menos que se imaginassem alguns círculos equantes, com os quais o planeta não pareceria mover-se numa velocidade uniforme, nem em seu orbe deferente, nem em torno do seu centro (COPÉRNICO, 2003, p. 112,13).

A seguir, Copérnico passa a expor o modo de resolver este difícil problema utilizando, “elementos menos numerosos, mais simples, e muito mais convenientes” do que aqueles usados por seus contemporâneos e predecessores. A solução sugerida por ele estava assentada em um conjunto de sete exigências, ou pressupostos astronômicos:

PRIMEIRA EXIGÊNCIA - Não existe um centro único de todos os orbes ou esferas celestes.

SEGUNDA EXIGÊNCIA - O centro da Terra não é o centro do mundo, mas apenas o da gravidade e do orbe lunar.

TERCEIRA EXIGÊNCIA - Todos os orbes giram em torno do Sol, como se ele estivesse no meio de todos; portanto, o centro de universo está perto do Sol.

QUARTA EXIGÊNCIA - A razão entre a distância do Sol à Terra e altura do firmamento é menor do que a razão entre o raio da Terra e a sua distância ao Sol; e com muito mais razão esta é insensível confrontada com a altura do firmamento.

QUINTA EXIGÊNCIA - Qualquer movimento aparente no firmamento, não pertence a ele, mas à Terra. Assim a Terra, com os elementos adjacentes, gira em torno dos seus pólos

invariáveis em um movimento diário, ficando permanentemente imóveis o firmamento e o último céu.

SEXTA EXIGÊNCIA - Qualquer movimento aparente do Sol não é causado por ele mas pela Terra e pelo nosso orbe, com o qual giramos em torno do Sol como qualquer outro planeta. Assim, a Terra é transportada por vários movimentos.

SÉTIMA EXIGÊNCIA - Os movimentos aparentes de retrogressão e progressão dos errantes não pertencem a eles mas à Terra. Apenas o movimento desta é suficiente para explicar muitas irregularidades aparentes no céu (COPÉRNICO, 2003, p. 114 – 117).

Na primeira exigência, Copérnico rejeita os sistemas homocêntricos, um procedimento que era adotado pela maior parte dos seus contemporâneos.

A segunda exigência já sinaliza um afastamento das concepções geocêntricas. A Terra é retirada do centro do universo e é feita uma clara distinção entre o centro do universo e o centro de gravidade. O centro da Terra é postulado como sendo apenas o centro de gravidade – o lugar para onde se dirigem os graves. Este procedimento é, de certa forma, ambíguo, pois ao desqualificar a Terra como centro do universo Copérnico rejeita uma das premissas da física aristotélica, porém ao mantê-la como centro de gravidade ele continua explicando a queda dos graves em termos aristotélicos. Nesta os graves têm a propensão natural de se movimentarem em direção ao centro do universo – o centro da Terra (MARTINS, 2003, p. 114). Em verdade, Copérnico não dispõe de uma física para substituir a aristotélica, e, ao que parece, não era esta a sua intenção.

Na terceira exigência Copérnico postula que os planetas se movimentam em torno do Sol que se encontra próximo ao centro do universo.

Com a quarta exigência Copérnico postula que a distância da Terra ao Sol é muito pequena em comparação com aquela entre o Sol e a esfera das estrelas fixas. Com este procedimento ele justifica, por exemplo, a ausência de observações da paralaxe das estrelas, ampliando, em muito, o universo conhecido desde os gregos, que já haviam levantado este problema para não aceitar o sistema heliocêntrico proposto por Aristarco de Samos (~ 310-230 a.C).

Na quinta exigência Copérnico atribui à Terra um movimento diário de rotação em torno de seu próprio eixo. Para contornar uma das objeções a este movimento, argumenta que os elementos adjacentes à Terra (ar, nuvens, pássaros, etc.) acompanham o seu movimento. Um argumento que retoma a questão da relatividade dos movimentos, abordada por Oresme (1325-1382) no século XIV e que está presente na reflexão teológico-cosmológica de Nicolau de Cusa (1401-1464), desenvolvida um pouco antes do nascimento de Copérnico (PEDUZZI, 2008; KUHN, 1990).

Com a sexta exigência, Copérnico postula que o movimento anual atribuído ao Sol é apenas um movimento aparente. É a Terra que efetua este movimento, atravessando o Zodíaco ao longo do ano, criando assim a ilusão de que este movimento é efetuado pelo Sol, que se encontra sempre na extremidade oposta à Terra (MEDEIROS; MONTEIRO 2002).

A sétima exigência permite a Copérnico explicar as irregularidades aparentes dos movimentos dos planetas (paradas e retrogradações) como consequência do movimento de translação Terra (Fig.1).

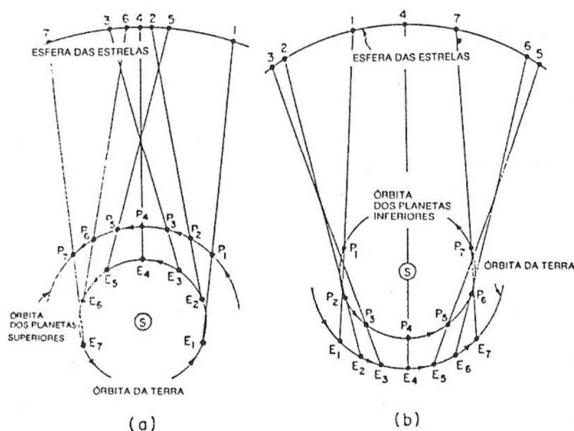


Figura 1 - A explicação copernicana do movimento retrógrado: a) planetas superiores; b) planetas inferiores.

Fonte: Kuhn (1990, p. 195).

Dessa forma, com essas premissas, Copérnico se propõe a mostrar, concisamente, como o princípio da uniformidade do movimento circular pode ser mantido para o movimento dos planetas.

O *Commentariolus* não chegou a ser publicado, tendo circulado apenas sob a forma manuscrita. É uma obra de caráter qualitativo, na qual Copérnico praticamente não utiliza demonstrações matemáticas. No entanto, chega a declarar que as destinou “para um volume maior” (COPÉRNICO, 2003, p. 117), o que parece ser um indício de que ele pretendia expor a sua teoria em uma obra de maior amplitude.

Nos anos seguintes, e até quase o final de sua vida, Copérnico trabalhará intensamente na construção de sua teoria astronômica, discutindo-a com outros astrônomos, desenvolvendo deduções e métodos de cálculo, estudando as tabelas disponíveis e realizando, ele próprio, algumas observações (MARTINS, 2003).

Além de astrônomo matemático, Copérnico era também um homem de letras, atuou como diplomata e economista e foi membro do corpo administrativo da Igreja Católica, como cônego na cidade de Frauemburg. Essas habilidades, acrescidas à sua reputação como astrônomo, ajudaram-no a conquistar importantes aliados. Estes o incentivaram a expor à sua teoria em uma obra mais detalhada, assim como divulgaram e defenderam o sistema heliocêntrico. Entre os aliados de Copérnico estavam: o cônego Tiedemann Giese, seu companheiro no bispado de Frauemburg, que em 1530 escreveu uma pequena obra intitulada *Hyperaspistes*, na qual defendeu a teoria heliocêntrica procurando mostrar que ela é compatível com a fé. O chanceler austríaco Johann Albrecht von Widmanstadt, secretário particular do Papa, que expôs as ideias de Copérnico no Vaticano, com boa aceitação. O arcebispo de Cápua, Nicolau Schönberg, que escreveu a Copérnico, incentivando-o a publicar as suas ideias, e o Astrônomo Georg Joachin von Lauchen, conhecido com Rético, que durante algumas semanas de 1539, trabalhou com Copérnico e o estimulou publicar a sua teoria (MARTINS, 2003, p.97-104).

Rético tornou-se um grande entusiasta das ideias de Copérnico, chegando a escrever, a pedido deste, um pequeno tratado – a *Narratio Prima* - onde, com maestria, expôs as ideias do sistema heliocêntrico, contidas no manuscrito que pacientemente Copérnico preparava para publicação. Ao ser publicado em fevereiro de 1540, o livro de Rético recebeu boa acolhida, preparando os espíritos para a grande mensagem que estava por vir (KOESTLER, 1989).

Em 1543, após anos de estudos, é publicado o tão esperado tratado de Copérnico: “Sobre a rotação das esferas celestes” (*De revolutionibus orbium caelestium*). Esta obra é composta por um conjunto de seis livros, sendo editada um pouco antes da morte de Copérnico. Nela, a teoria heliocêntrica, apenas esboçada no *Commentariolus*, se apresenta desenvolvida e articulada em um sistema astronômico matematicamente estruturado, potencialmente capaz de fornecer uma alternativa ao *Almagesto*.

É importante salientar que, embora tenha conseguido importantes aliados para a sua teoria, e de ter preparado uma obra tecnicamente respeitável, Copérnico relutou muito em publicar o *De revolutionibus*. Na dedicatória de seu livro ao papa Paulo III, ele menciona a sua dúvida e receio diante das possíveis reações adversas.

Seguramente bem posso, Santíssimo Padre, ter a certeza de que certas pessoas, ao ouvirem dizer que eu atribuo determinados movimentos ao globo terrestre, nestes meus livros escritos acerca das revoluções das esferas do Universo, imediatamente hão de gritar a necessidade de eu ser condenado juntamente com tal opinião. [...]. Por isso, ao pensar comigo mesmo como aqueles que afirmam ser confirmada pelo julgamento de muitos séculos a opinião de que a Terra está imóvel no meio dos céus e aí está colocada servindo-lhe de centro, haviam de considerar uma cantilena absurda defender eu, pelo contrário, que é a Terra que se move; hesitei comigo durante muito tempo se havia de dar a lume os meus Comentários escritos para demonstração desse movimento, ou se seria preferível seguir o exemplo dos Pitagóricos e de alguns outros que procuravam confiar os mistérios da filosofia aos seus familiares, amigos e a ninguém mais, não por escrito mas de viva voz, como atesta a carta de Lísias a Hiparco (COPÉRNICO, 1996, p.5).

A hesitação de Copérnico talvez se justifique em função da ousadia de sua proposta de tirar a Terra do centro do Universo, e de, possivelmente, vislumbrar as possíveis implicações de sua teoria sobre as concepções filosóficas e religiosas, que tinham a imobilidade e centralidade da Terra como dogmas. Ou talvez, ainda, pelo fato dele não dispor de uma física que desse suporte à sua teoria.

O caráter revolucionário da teoria de Copérnico está em colocar o Sol no centro do sistema. Com este procedimento, que ele justifica já no *Commentariolus*, é possível explicar com simplicidade os movimentos retrógrados dos planetas, dispensando o uso do equante que, segundo ele, violava o princípio da uniformidade do movimento circular, pois o centro do epiciclo de um planeta não descreve ângulos iguais em tempos iguais, seja em relação ao deferente, seja em relação ao centro da Terra, realizando-o apenas em relação ao equante.

É interessante observar que Copérnico ao construir o seu sistema astronômico heterodoxo, mantém uma atitude híbrida de continuidade e ruptura com a tradição científica herdada dos antigos. Por um lado, revela-se revolucionário ao propor novos papéis para o Sol e a Terra, por outro se mostra conservador, ao manter-se apegado ao dogma da uniformidade do movimento circular (BUTTERFIELD, 1992, p.38). É este apego ao princípio do movimento circular uniforme, que o leva a rejeitar o equante, então largamente utilizado por seus contemporâneos.

Os quatro primeiros capítulos do Livro I do *De revolutionibus* são assim intitulados: I – O universo é esférico; II – A Terra também é esférica; III – Como a Terra forma um só globo com a água; IV – O movimento dos corpos celestes é uniforme, perpétuo e circular ou composto de movimentos circulares (COPERNICO, 1996, p. 17-27). Uma rápida leitura desses capítulos revela que, eles poderiam, perfeitamente, ter sido escritos por um aristotélico. Ao analisá-los Kuhn se detém especialmente sobre o capítulo IV, tecendo um significativo comentário em que evidencia o dualismo revolucionário-conservador, presente no espírito de Copérnico:

Aqui Copérnico fornece a versão mais completa e poderosa que já alguma vez examinamos do argumento tradicional para restringir os movimentos dos corpos celestes a círculos. Só um movimento circular uniforme, ou a combinação de tais movimentos, pode, pensa ele, explicar a ocorrência regular de todos os fenômenos celestes a intervalos de tempo fixos. Até agora, todos os argumentos de Copérnico são ou aristotélicos ou escolásticos, e o seu universo não é distinguível da cosmologia tradicional. Em alguns aspectos, é até mais aristotélico do que muitos dos seus predecessores e contemporâneos. Ele não consentirá, por exemplo, na violação do

movimento simétrico e uniforme de uma esfera que está implícito no uso de um equanto.

O radical Copérnico mostrou-se até agora um conservador em todos os aspectos. Mas não pode adiar por mais tempo a introdução do movimento da Terra. Ele deve agora tomar consciência do seu corte com a tradição. E bastante estranhamente, é no corte que Copérnico mostra, mais claramente, a sua dependência da tradição (KUHN, 1990, p. 175).

A ousada proposta de Copérnico de colocar o Sol como centro do Universo, transformando a Terra em um simples planeta, é sustentada no *De revolutionibus* por meio de rigorosas demonstrações matemáticas articuladas aos dados observacionais provenientes das tabelas astronômicas disponíveis e algumas observações do próprio Copérnico. Contudo, além do formalismo matemático e da frieza dos dados, componentes intelectuais de natureza metafísica atuaram, de algum modo, na formulação de suas ideias astronômicas, como se pode depreender na seguinte passagem do seu tratado.

[...] No meio de todos encontra-se o Sol. Ora quem haveria de colocar neste templo, belo entre os mais belos, um tal luzeiro em qualquer outro lugar melhor do que aquele donde ele pode alumiar todas as coisas ao mesmo tempo? Na verdade, não sem razão, foi ele chamado o farol do mundo por uns e por outros a sua mente, chegando alguns a chamar-lhe o seu Governador. [Hermes] Trimegisto apelidou-o de Deus visível e Sófocles em Electra, o vigia universal. Realmente o Sol, está como que sentado num trono real, governando a sua família de astros, que giram em volta dele (COPERNICO, 1996, p.52-53).

Dessa forma, a face conservadora de Copérnico se manifesta no fato de que ele é um herdeiro da astronomia ptolomaica, pois a conhecia profundamente, sendo inclusive capaz de identificar as anomalias não previstas a partir do *Almagesto*. Por outro lado, a sua ousadia revolucionária também se ancora na tradição, pois tem como pressuposto teórico e filosófico a sua intransigente crença no dogma da circularidade. É na Antiguidade Clássica que Copérnico busca apoio para a sua hipótese sobre o movimento da Terra. A sua adoção do Sol

como centro do mundo está associada às suas concepções metafísicas neoplatônicas ligadas ao hermetismo, aos seus valores estéticos de beleza e perfeição (KUHN, 1990, p. 155; 161-162).

Silveira (2002), apoiando-se em Burt (1983), Kuhn (1990) e Popper (1989), chama a atenção para o fato de que no *Commentariolus* as sete exigências apresentadas por Copérnico são elas próprias precedidas por uma importante premissa metafísica: “É legítimo tomar qualquer ponto de referência astronômico que seja a Terra?” (BURT, p.40). Para Silveira, complementando a reflexão tecida por Medeiros e Monteiro (2002), em um artigo anterior:

conferir visibilidade à premissa metafísica que está na gênese da revolução copernicana”, contribui para uma abordagem do modelo heliocêntrico voltada para a promoção entre os estudantes de uma compreensão de que “o conhecimento científico não está isento de influências contextuais e sócio-históricas (SILVEIRA, 2002).

No sistema copernicano o Sol se encontra imóvel e em torno dele os planetas movimentam-se na seguinte ordem: Mercúrio, Vênus, Terra (com a Lua girando ao seu redor), Marte, Júpiter e Saturno.

Por exigência do movimento da Terra, o Universo copernicano é muito grande, bem maior do que o grego, que não era pequeno. Contudo, ele é finito e limitado pela esfera das estrelas que se encontra em repouso, sendo o seu movimento aparente, explicado pelo movimento de rotação da Terra em torno de seu eixo.

É interessante observar que um dos argumentos de Copérnico, exposto no *Commentariolus*, em defesa de suas ideias era o de que elas eram mais simples que as de Ptolomeu. Nessa perspectiva, ele procura eliminar os equantes e as irregularidades das rotações usando apenas movimentos circulares uniformes em torno dos centros. Além disso, ele procura explicar, adequadamente, os movimentos planetários usando uma quantidade de círculos menor do que a utilizada por Ptolomeu. Contudo, o sistema de Copérnico não é assim tão simples. Por exemplo, no *Commentariolus* ele utiliza 34 círculos para explicar o movimento dos planetas; porém o refinamento do seu sistema leva-o a utilizar 48 círculos no *De revolutionibus*. Em contrapartida, o sistema de Ptolomeu aperfeiçoado por Peurbach, antecessor imediato de Copérnico, contava com apenas 40 círculos (MARTINS, 2003, p. 81-82).

Martins (2003) chama a atenção ainda para o fato de que Copérnico, ao construir a sua teoria, em geral, lança mão de recursos totalmente clássicos: deferentes, excêntricos e epiciclos, chegando mesmo a ir na contracorrente de seus contemporâneos, ao recusar o equante, optando pelo uso de técnicas pré-ptolomaicas.

Copérnico pertence a um restrito grupo de astrônomos europeus responsáveis pelo renascimento da tradição helênica da astronomia matemática técnica, que culminou na obra de Ptolomeu. Kuhn (1990, p. 162) observa que, “O *De revolutionibus* foi modelado segundo o *Almagesto* e era dirigido quase exclusivamente àquele grupo de astrônomos contemporâneos equipados para ler o tratado de Ptolomeu”.

Na construção de sua teoria Copérnico fez poucas observações. No *De revolutionibus*, por exemplo, ele cita apenas 27 medidas por ele realizadas. Todavia, como salienta Martins (2003, p. 78), “nenhuma dessas medidas foi necessária nem suficiente para a edificação de sua teoria”. A sua ideia de colocar o Sol como centro do universo, não adveio de novas observações, mas de uma nova forma de interpretar os dados observacionais (POPPER, 1982, p. 214).

Com o *De revolutionibus* a teoria heliocêntrica adquire uma consistência matemática que a torna cientificamente respeitável e, especialmente, sedutora àqueles que já vinham, há muito, insatisfeitos com as lacunas apresentadas pela obra que, desde a Antiguidade, tinha se transformado na grande referência para o estudo do movimento dos corpos celeste, o *Almagesto* de Ptolomeu (KUNH, 1996).

Contudo, a teoria copernicana quando surge é apenas uma promessa; se por um lado ela resolve muitos problemas não resolvidos pela teoria de Ptolomeu, por outro ela coloca novos problemas de natureza observacional e teórica, exigindo uma considerável ampliação no tamanho do Universo e, nada mais nada menos que, a gênese de uma nova física (COHEN, 1988). Com o *De revolutionibus* a astronomia ganha um novo Paradigma (KUNH, 1996). O desafio posto às gerações de copernicanos que sucederiam Copérnico residia justamente na construção de uma nova física que desse legitimidade teórica ao sistema copernicano. Galileu, Descartes e Newton serão os personagens proeminentes dessa tarefa histórica, devendo-se acrescentar a contribuição astronômica de Kepler.

Os estudiosos que defendiam a imobilidade da Terra, bem como a sua posição central no Universo, levantavam contra a teoria heliocêntrica uma série de argumentos de natureza científica e filosófica que tornava extremamente problemática a sua aceitação, à luz da estrutura conceitual e da precisão observacional da época. Embora esta

teoria, do ponto de vista matemático, houvesse demonstrado a sua relativa funcionalidade, do ponto de vista físico, aceitá-la não era uma tarefa simples. Alguns dos obstáculos à aceitação da teoria copernicana são comentados a seguir.

A atribuição de um movimento de rotação à Terra - caracterizando os movimentos diários do Sol e das estrelas como aparentes - contrariava o senso comum e também certos conceitos da física aristotélica que com ele estavam em harmonia. Os corpos ao serem soltos do alto de uma torre caem ao pé desta, não são deslocados para oeste; os elementos adjacentes à Terra não são deixados para trás em função do movimento rotacional da Terra; os corpos sobre a superfície da Terra não são lançados para fora desta devido à “tendência centrífuga” e a Terra não se despedaça sob a ação desta, o que deveria ocorrer, segundo a física aristotélica.

Copérnico se defende timidamente desses argumentos, recorrendo à relatividade dos movimentos e postulando que a rotação da Terra é um movimento natural, e que a tendência de lançar os corpos para fora só ocorre nas rotações forçadas, ou violentas (COPÉRNICO, 1996).

Ao movimento de translação da Terra se contrapõe a não observação da paralaxe das estrelas. Copérnico tenta resolver este problema aumentando consideravelmente o tamanho do universo e criando um problema de natureza filosófica ao trazer a implicação de um universo, praticamente infinito. Embora formalmente o universo copernicano fosse finito.

A atribuição de movimentos à Terra levanta também à questão do movimento da Lua. Como é possível que a Lua continue a se mover ao redor da Terra enquanto esta se lança no espaço? Por que a Lua, assim como os corpos terrestres, não caía sobre a superfície da Terra, apesar de manter-se, aparentemente ligada à ela? Copérnico não tem resposta. Esta questão só viria a ser adequadamente respondida com o advento da mecânica newtoniana e a teoria da gravitação universal (PEDUZZI, 2008a, p.84; MEDEIROS; MONTEIRO, 2002, COHEN, 1983).

Se a Terra não é o centro do Universo, mas apenas um planeta, dotado do mesmo tipo de movimento que os demais, então pode haver outras semelhanças, por exemplo, os quatro elementos que compõem as coisas existentes na Terra, podem também estar presente em outros planetas. Com isso, a Terra perde a sua singularidade. A admissão de tal possibilidade vai de encontro à cosmologia aristotélica, que afirma que o mundo sublunar e mundo supralunar são espaços físicos distintos (PEDUZZI, 2008a, p.84; BURTT, 1983, p. 33).

O deslocamento do centro do Universo para as proximidades do Sol evidencia para os estudiosos, especialmente os críticos, a seguinte questão: se o centro do universo é o Sol, então por que os graves continuam a cair em direção ao centro da Terra? Copérnico argumenta então que a Terra não é o centro do Universo, mas é o centro de gravidade para estes corpos, de forma que o seu movimento de queda, na sua teoria, continua sendo um movimento natural.

Ao fazer a distinção entre o centro do universo e centro de gravidade, Copérnico sinaliza um novo sentido para o tradicional conceito de gravidade, ao sugerir uma espécie de princípio atrativo inerente à matéria, compartilhando por outros corpos celestes além da Terra:

[...] Quanto a mim penso que a gravidade outra coisa não é senão um certo desejo natural introduzido nas partes pela divina Providência do autor do Universo para que se encontrem na sua unidade e integridade, reunindo-se em forma de esfera. E é de crer que esta tendência exista também no Sol e na Lua, assim como nos outros planetas, para que por seu efeito eles possam conservar a forma esférica com que apresentam (COPÉRNICO, 1996, p. 45).

Medeiros e Monteiro (2002) veem nessa argumentação “um germe da ideia de uma força gravitacional como a que apareceria na mecânica newtoniana, bem como a unificação de alguns fenômenos ocorridos na superfície da Terra, com aqueles ocorridos nos demais planetas”.

É possível que um olhar em retrospectiva, a partir do ponto de vista privilegiado da física e da história da ciência em seu estágio atual, sugira o vislumbre desse “germe da ideia de uma força gravitacional”, no espírito de Copérnico. No entanto, deve-se ressaltar esta é uma interpretação do leitor do século XXI. Faz-se necessário aqui um certo cuidado no sentido de não propiciar ao estudante uma visão anacrônica da história da ciência. Embora se avalie que a intenção dos autores não foi suscitar este tipo de interpretação.

De qualquer forma, essa argumentação de Copérnico sobre a queda dos corpos, sinalizando um novo conceito de gravidade, nesta nova Terra deslocada do centro do universo é especialmente significativa para a reconstrução histórica aqui desenvolvida, cujo fio condutor reside na reflexão histórico-epistemológica do processo de

produção e transformação das ideias científicas que, seguindo uma trajetória marcada por rupturas e continuidades, idas e vindas, culminou na formulação de uma nova mecânica e na gênese da teoria da gravitação universal.

Há ainda outras objeções e problemas suscitados pela teoria heliocêntrica, por exemplo, as objeções de natureza filosófico-religiosa e ideológica. Não se deve perder de vista que, Copérnico foi contemporâneo da Reforma Protestante e que, antes da publicação do *De revolutionibus*, a sua teoria já havia sido duramente criticada por Martinho Lutero (1483-1546), que não via com bons olhos a retirada da Terra da posição central do universo, pois dessa forma o homem, a imagem de Deus, era banido de sua posição privilegiada para um lugar secundário, um simples planeta como qualquer outro. Logo depois do livro de Copérnico ser publicado o reformador Melanchton escreveu um pequeno livro de física censurando a teoria heliocêntrica (RONAN, 1987).

Em contrapartida, o mundo de Copérnico passa por profundas transformações econômicas, sociais, políticas e culturais. A Terra vinha, desde o início de século XV, sendo consideravelmente ampliada pelos marinheiros e homens de negócio, com a descoberta de novas terras e um novo continente. Este fato, sem dúvida, repercutiu fortemente no espírito dos pensadores da época, se a Terra era muito mais ampla do que afirmavam os antigos, por que não o cosmo? Assim, fatores de natureza histórico-cultural contribuíram para tornar plausível a teoria copernicana, não obstante os obstáculos de natureza científica que deveriam ser superados, para que esta teoria, do ponto de vista físico, pudesse ser aceita. Esta tarefa, contudo, não será empreendida por Copérnico. A sua obra apenas suscitou a necessidade da ruptura com a tradição. A revolução copernicana será, de fato, conduzida pelos seus sucessores, concluindo-se apenas com o advento de outra revolução – a newtoniana (COHEN, 1983, KUHN, 1990).

4. 3 TYCHO BRAHE

A teoria heliocêntrica de Copérnico, consolidada no *De revolutionibus*, deixou para as gerações posteriores de astrônomos uma mensagem, ao mesmo tempo alvissareira e perturbadora. Para os copernicanos de inspiração neoplatônica a posição do Sol como centro do Universo era extremamente elegante, correspondendo aos seus pressupostos filosóficos de harmonia matemática. Por outro lado, para os anticopernicanos o heliocentrismo era um absurdo, pois além de

carecer de evidências observacionais, a sua aceitação implicava em uma completa destruição da cosmologia então vigente (KOYRÉ, 1991).

Contudo, se do ponto de vista físico e cosmológico a teoria copernicana era problemática, sob o aspecto cinemático ela já havia dado provas de sua funcionalidade, o que, aliado à sua consistência matemática, fazia-a exercer um grande fascínio intelectual sobre boa parte dos astrônomos. Assim, após a morte de Copérnico muitos estudiosos, apesar de considerarem a teoria copernicana inconsistente do ponto de vista físico, a utilizam como instrumento de cálculo. Entre os muitos adeptos de tal visão instrumentalista Martins (2003, p. 80; 92-93), aponta: Erasmus Reinhold; Gaspar Peucer; Michael Maestlin (1550-1631), que foi professor de Kepler e usou dados de Copérnico em seu livro *Epítome astronomicae* (1588) sem assumir explicitamente a sua teoria; o jesuíta Christophorus Clavius, que se opunha ao sistema copernicano, mas considerava Copérnico um grande reformador da astronomia, tendo inclusive utilizado suas observações e catálogos de estrela, e Giuseppe Magini (1555-1617) que foi professor de matemática na universidade de Bolonha.

Esse uso meramente instrumental da teoria copernicana abre espaço para que ela seja, de fato, estudada e debatida criando assim, entre os estudiosos, uma inquietação científica profícua à busca de novas hipóteses explicativas para os movimentos e demais fenômenos celestes, à utilização de novos instrumentos e técnicas de medição, bem como à adoção de uma maior regularidade e rigor nas observações astronômicas.

É neste contexto que, na segunda metade do século XVI, surge a figura do astrônomo dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601). Tycho foi, ao longo de sua vida, um meticuloso observador dos céus, introduzindo mudanças significativas nas técnicas de observação e nos padrões de precisão exigidos pelos dados astronômicos. Pôs a criatividade técnica de sua época a serviço da observação astronômica, projetando e construindo uma gama de instrumentos novos, maiores, mais precisos e estáveis dos que os usados até então (RONAN, 1987, p.74). Estudou e corrigiu vários erros associados ao uso desses instrumentos, estabelecendo novas técnicas para a coleta de informações precisas sobre as posições dos planetas e estrelas. Além disso, introduziu a prática de observar regularmente a posição dos planetas à medida que estes se moviam pelos céus, ao invés de só observa-los em algumas ocasiões singulares, como os seus antecessores (KUHN, 1990, p.233).

Com os seus instrumentos e suas novas técnicas de observação, Tycho Brahe e os seus colaboradores conseguiam medir as posições

planetárias com precisão de até 4' de arco, mais que o dobro das melhores observações da Antiguidade. Seus trabalhos proporcionam aos astrônomos um amplo conjunto de dados atualizados e precisos, libertando-os da dependência dos dados antigos e eliminando vários problemas astronômicos aparentes, que surgiram com o uso sistemático de dados imprecisos, ou pouco confiáveis (KUHN, 1990, p. 233).

O interesse de Tycho pelo estudo dos céus foi despertado, por volta dos quatorze anos quando estudava retórica e filosofia na Universidade de Copenhague. Nessa época houve um eclipse parcial do Sol, e o fato desse evento ter sido previsto pelos astrônomos causou uma forte impressão no jovem Tycho. Encantado com a possibilidade de se prever com exatidão os eventos celestes, adquire vários livros de astronomia, inclusive o *Almagesto* de Ptolomeu, dedicando-se com afinco ao estudo dessas obras (KOESTLER, 1989).

Em 17 de agosto de 1563, aos dezessete anos, Tycho faz a sua primeira observação astronômica, registrando a conjunção de Júpiter e Saturno. Consultando as tabelas astronômicas, descobre que as Tábuas Afonsinas apresentavam um erro de um mês e as Tábuas Prussianas um erro de vários dias, em relação a este evento. Essas discrepâncias lhe revelam a necessidade de um novo padrão de precisão na astronomia (MOURÃO, 2003, p.76).

Ao longo de sua vida Tycho Brahe construirá uma sólida carreira de astrônomo observacional e será, por razões religiosas – Tycho era protestante – e também físicas e astronômicas, um ferrenho opositor do sistema copernicano.

Brahe deu particular importância ao imenso vazio que a teoria de Copérnico abriu entre a esfera de Saturno e as estrelas, simplesmente para explicar a ausência de movimentos paraláticos observáveis. Ele próprio procurara a paralaxe com seus grandes e novos instrumentos. Como não a encontrou, viu-se forçado a rejeitar o movimento da Terra. A única alternativa compatível com as suas observações exigira uma distância entre a esfera de estrelas e Saturno setecentas vezes superior à distância entre Saturno e o Sol (KUHN, 1990, p.233-234).

Em 1572 surgiu um novo corpo celeste na constelação de Cassiopeia. O novo habitante dos céus era muito brilhante, ficando visível durante dezoito meses até desaparecer. O fenômeno atraiu a atenção dos astrônomos, filósofos, astrólogos e místicos, e teve para a cosmologia e a astronomia um significado especial. O novo objeto, em função de suas características, só podia ser uma estrela; uma nova estrela nos céus que, até então, eram considerados imutáveis pela

concepção cosmológica dominante (MOURÃO, 2003, p.83; MEDEIROS, 2001).

Em vários locais da Europa os astrônomos observam o evento com especial interesse e tentam, sem sucesso, medir a paralaxe, entre eles: Maestlin e Thomas Digges. Tycho usa seus novos instrumentos para medir a paralaxe, mas também fracassa. Entretanto, dada a precisão das suas medidas, tal insucesso fornece a ele e aos demais astrônomos indícios que põem em xeque o dogma da imutabilidade do cosmos aristotélico.

Esse fenômeno isoladamente não seria capaz de destruir a crença na imutabilidade do mundo supralunar. Contudo, provas adicionais surgiram quando Tycho e seus contemporâneos observaram sucessivos cometas nos anos de 1577, 1580, 1585, 1590, 1593, e 1596. Nessas observações não se detectou qualquer paralaxe, revelando que os cometas estavam localizados além da esfera da Lua, e que se moviam através das regiões outrora preenchidas pelas esferas cristalinas. Diante dessas evidências, tornava-se cada vez mais difícil, para os astrônomos mais competentes e menos arraigados à tradição aristotélica, continuar a ignorar a mutabilidade dos céus, bem como sustentar a crença na existência das esferas cristalinas como realidade física. O enfraquecimento da antiga cosmologia, sem dúvida, contribuía para uma melhor aceitação da teoria copernicana (KUHN, 1990, p.240; DEBUS, 1996, p.164).

As novas descobertas da observação astronômica, ou antes, a nova forma dos astrônomos olharem os céus, foram assimiladas como provas da teoria copernicana, muito embora não estivessem diretamente relacionadas com o movimento da Terra. No caso da nova e dos cometas, o caráter supralunar desses objetos foi determinado tanto por copernicanos como Maestlin, como por anticopernicanos como Tycho, que fez medidas bem mais precisas que os seus adversários.

Contudo, embora tais observações não derivem diretamente da teoria copernicana é muito difícil dissociá-las do cenário científico e intelectual, criado com a gênese e a publicação do *De revolutionibus*. Kuhn salienta que:

Durante a última metade do século XVI, fenômenos antigos mudaram rapidamente de significado e importância. Essas mudanças parecem incompreensíveis sem a referência ao novo clima de pensamento científico, de que

Copérnico foi um dos primeiros representantes principais (KUNH, 1990, p.241).

A crença na imutabilidade do cosmos, transformada em dogma pela combinação do pensamento aristotélico com a teologia cristã, contribuiu para que durante séculos os astrônomos ocidentais não dessem importância aos fenômenos que sugerissem transformações celestes. Kuhn chama a atenção para o fato de que, só após o surgimento do modelo de Copérnico os astrônomos passaram a observar mudanças nos céus. Por outro lado, no oriente, em outro contexto cultural: “Os chineses, cujas crenças cosmológicas não excluam mudanças celestes, haviam registrado o aparecimento de muitas novas estrelas nos céus numa época muito anterior” (KUNH, 1996, p. 151).

Embora Tycho Brahe tenha contribuído significativamente para a derrocada da cosmologia tradicional, ele não conseguia aceitar o movimento da Terra. Diante da ausência de paralaxe, o que exigia, em muito, a ampliação do Universo, e das dificuldades de ordem física inerentes a uma Terra móvel, Tycho opta por rejeitar o sistema copernicano.

A rejeição do sistema copernicano, contudo, não impede Tycho de perceber falhas na astronomia ptolomaica, nem ignorar “as harmonias matemáticas que o *De Revolutionibus* introduzira na astronomia” (KUNH, 1990, p. 234). Assim, Tycho elabora o seu próprio sistema, uma solução conciliatória. Neste, a Terra permanece estacionária e no centro do Universo; ao seu redor giram a Lua e o Sol, em torno do qual giram os planetas. Matematicamente este sistema era equivalente ao de Copérnico, sem apresentar os seus problemas (DEBUS, 1996, p. 165).

O sistema híbrido de Tycho (Fig. 2) foi durante algum tempo o polo de atração para muitos astrônomos competentes não copernicanos. Ele foi uma sinalização clara de que a astronomia ptolomaica estava em crise. Apesar do enorme esforço de Tycho para restabelecer a ordem dos céus, mantendo pelo menos a Terra no centro do Universo, o fato é que as suas medidas precisas, serão fundamentais para o efetivo funcionamento do modelo copernicano. Tarefa que será empreendida pelo seu mais notável adversário teórico e, ao mesmo tempo, colaborador - Johannes Kepler.

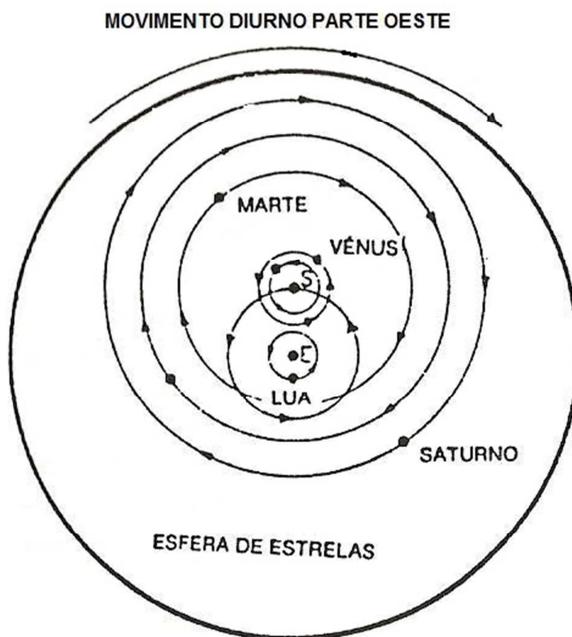


Figura 2 - Modelo híbrido de Tycho Brahe
 Fonte: Kuhn (1990, p. 234).

4.4 JOHANNES KEPLER

Na segunda metade do século XVI a teoria de Copérnico passou a ser usada de forma meramente instrumental, como mais um instrumento de cálculo, por uma parcela significativa de astrônomos. Entretanto, de algum modo, esta teoria perturbou a forma dos astrônomos estudarem os céus. Depois de 1543, mesmo os astrônomos anticopernicanos mais competentes não puderam ficar imunes à funcionalidade do modelo heliocêntrico, nem aos problemas - de ordem física, cosmológica e religiosa - por ele suscitados. Em Tycho, a influência do *De revolutionibus*, mesmo que não admitida por ele, aparece de forma pronunciada na formulação de seu modelo (KUHN, 1990, p.237).

Contudo, se por um lado Tycho reconhece a necessidade de reforma – suas precisas observações foram fundamentais para derrocada da antiga cosmologia - por outro, no que diz respeito aos problemas

levantados pela Terra móvel, ele não é capaz de romper tão radicalmente com a tradição. Caberá a Johannes Kepler (1571–1630), com base nos dados de Tycho e em uma profunda crença nas ideias de harmonia matemática, associadas a um universo centrado no Sol, aprofundar o corte iniciado por Copérnico, convertendo a sua inovação, “na primeira solução realmente adequada para o problema dos planetas” (KUHN, 1990, p. 239).

Kepler iniciou os seus estudos astronômicos na Universidade Protestante de Tübingen, onde ingressara com a finalidade de se formar em Teologia. Lá tem aulas com o astrônomo Michael Maestlin, que além de ensinar o sistema ptolomaico, conforme o programa oficial, também ensina o sistema copernicano para os seus melhores alunos. Aderiu então ao sistema copernicano, ao que parece, seduzido pelos argumentos neoplatônico de harmonia matemática introduzidos na obra de Copérnico (DEBUS, 1996, p. 167).

A primeira obra de Kepler, intitulada *Mysterium cosmographicum* (Mistério Cosmográfico), é publicada em 1596. Nela Kepler assumiu explicitamente a defesa do sistema de Copérnico, retomando e desenvolvendo os argumentos copernicanos de harmonia em diagramas detalhados. Já nesse primeiro trabalho o jovem astrônomo despertou a atenção de seus contemporâneos, especialmente Tycho Brahe, pelo seu grande talento matemático. Outra característica marcante desta obra era a acentuada presença de argumentos e pressupostos de trabalho que revelavam a extensão e profundidade das concepções metafísicas de Kepler. Essas ideias, aliadas a uma forte intuição física, e um intenso diálogo crítico com os dados observacionais, tiveram um papel proeminente no desenvolvimento de sua obra (DEBUS, 1996, p. 167; BURTT, 1983, p. 47-48; KUHN, 1990, p.250-251).

Convencido de que havia uma ordem matemática subjacente à organização do universo copernicano, Kepler argumentou que, tanto o número de planetas como as suas respectivas distâncias ao Sol, poderiam ser explicados a partir da relação entre as esferas planetárias e os cinco sólidos regulares – os sólidos platônicos (Fig.3). Dessa forma, o universo poderia ser representado com o Sol no centro, e as esferas planetárias de Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno, separadas entre si sucessivamente por um octaedro, um icosaedro, um dodecaedro, um tetraedro e um cubo (DEBUS, 1996, p.167-169).

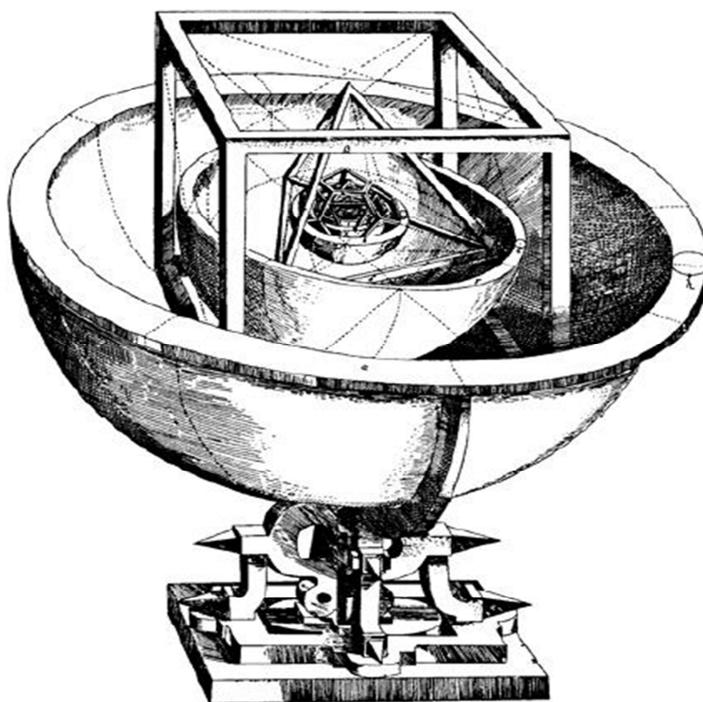


Figura 3 - Os sólidos platônicos e o modelo do universo kepleriano.
Fonte: Peduzzi (2008a, p.148).

Em sua defesa do sistema heliocêntrico Kepler é bem mais radical do que o seu fundador. Para ele, Copérnico, após a ousadia de atribuir a centralidade ao Sol e tornar a Terra móvel, não se afastara muito de Ptolomeu ao expor os detalhes de seu sistema. Como salienta Kuhn.

Copérnico não tinha sido muito bem sucedido ao tratar a Terra exactamente como outro planeta do sistema centrado no Sol. Ao contrário [dos primeiros livros] do *De Revolutionibus*, a explicação matemática do sistema planetário desenvolvido nos últimos livros atribuía várias funções especiais à Terra. Por exemplo, no sistema ptolomaico, os planos de todas as órbitas planetárias haviam sido construídos de maneira a

que todas intersectassem o centro da Terra, e Copérnico preservou esta função terrestre numa nova forma, ao desenhar todos os planos orbitais de modo a que se intersectassem o centro da órbita da Terra (KUHN, 1990, p. 243).

Para Kepler os planos das órbitas deviam se interceptar no Sol, uma vez que ele era o governante de todos os planetas. Era em relação ao Sol que se devia calcular as excentricidades planetárias, e não em relação à Terra. Assim, rejeitando muitas das técnicas ptolomaicas usadas por Copérnico, e atendo-se ferrenhamente a um copernicanismo mais estrito que o deste, Kepler assumiu para si, a tarefa de efetivamente construir técnicas matemáticas adequadas a um sistema em que o Sol ocupasse a posição proeminente (KUHN, 1990, p. 243; BURTT, 1983, p.53).

A partir de 1600, Kepler passa a integrar a equipe de colaboradores de Tycho Brahe, que havia se instalado no castelo de Benatky, nas proximidades de Praga, a convite do Imperador Rodolfo II. Tycho, interessado em obter a confirmação de seu modelo, encarregou Kepler de estudar o movimento de Marte, um problema difícil que vinha desafiando os astrônomos matemáticos desde a Antiguidade. A colaboração entre ambos, contudo, durou apenas um ano, pois em 1601 Tycho Brahe faleceu. Após a morte de Tycho, Kepler foi nomeado matemático imperial, e teve acesso irrestrito ao amplo conjunto de precisos dados do grande observador; o que lhe permitiu dar continuidade ao estudo de Marte (MOURÃO, 2003, p. 112-114; MEDEIROS, 2002).

Em suas sucessivas tentativas de obter a órbita de Marte, Kepler pôde confrontar as teorias planetárias de Tycho e de Copérnico, bem como algumas de suas próprias ideias acerca do funcionamento do modelo copernicano, com os precisos dados observacionais que dispunha. Consta que o modelo de Tycho não é aceitável, pois não se ajusta às suas próprias observações; o modelo de Copérnico, igualmente, não explica satisfatoriamente o movimento de Marte (RONAN, 1987, p.77). Em um trabalho paciente e exaustivo elabora inúmeras combinações de círculos, experimenta e rejeita sucessivos sistemas explicativos, que não se ajustam às precisas observações de Tycho.

Todas as soluções intermediárias eram melhores do que os sistemas de Ptolomeu e de Copérnico; algumas davam erros inferiores a 8' de arco, bem

dentro dos limites da observação antiga. A maioria dos sistemas que Kepler banuiu teria satisfeito todos os antigos astrônomos matemáticos. Mas estes tinham vivido antes de Brahe, cujos dados tinha uma exactidão de 4' de arco (KUHN, 1990, p. 244).

Após uma longa série de tentativas infrutíferas de explicar o movimento de Marte, em termos de movimentos circulares, Kepler, aos poucos se convence da necessidade de procurar um outro tipo de curva (KUHN, 1990, p.244). O dogma do movimento circular, herança cultural dos antigos gregos, começa a esboçar sinais de sua inadequação em face de uma nova atitude de investigação da natureza em que, a validação dos pressupostos teóricos passa pelo confronto com a precisão dos dados observacionais (KOYRÉ, 1992).

Contudo, antes de resolver o problema da órbita de Marte, Kepler o abandona temporariamente. Transfere o seu foco de investigação para um reexame da órbita da Terra, com o objetivo de ajustar as observações de Marte, obtidas por Tycho, segundo o modelo de uma Terra fixa, à nova situação de uma Terra móvel (PEDUZZI, 2008, p.150; MOURÃO, 2003, p.123). Neste estudo agrega ainda uma questão que há muito o intrigava: qual é a relação que existe entre a distância de um planeta ao Sol e sua velocidade? Essa questão é importante no processo de construção da teoria da gravitação, porque é a partir dela que Kepler empreende os primeiros esforços no sentido de construir uma dinâmica para o sistema heliocêntrico, transferindo para o mundo celeste algumas ideias da física terrestre (KUHN, 1990).

Para Kepler, em conformidade com suas convicções neoplatônicas, todos os fenômenos naturais eram redutíveis a leis matemáticas simples, e o Sol era o agente físico responsável por todos os movimentos celestes. A este misto de crença mística e intuição física, Kepler associou as ideias do físico William Gilbert (1540-1603), cujas pesquisas sobre o magnetismo foram divulgadas na obra *De magnete*, publicada em 1600. No *De magnete*, Gilbert concebeu a Terra como um gigantesco ímã cuja ação mantém os corpos presos à superfície da Terra. Nesta concepção a queda dos corpos se devia a uma força magnética, que se estendia pelo espaço através de um fluido magnético (KUHN, 1990; PEDUZZI, 2008a).

Inspirado pela força magnética de Gilbert, Kepler argumenta que os planetas, ao descreverem suas órbitas, são empurrados pelos raios de uma força motriz que emana do Sol, que é um grande ímã a girar em

torno de seu próprio eixo. Os raios dessa força - a *anima motrix* - devem se restringir ao plano da eclíptica, tendo em vista que os planetas movimentam-se nele, ou em suas proximidades. Quanto maior a distância do planeta ao Sol, menor a quantidade de raios que o atingem e, conseqüentemente, menor a força que conduz o planeta em torno do Sol. A partir desta incipiente ideia de força, na qual está subjacente a ideia aristotélica de proporcionalidade entre força e velocidade, Kepler deriva uma primeira lei de velocidade: quanto mais afastado do Sol, menor a velocidade do planeta. Usa então esta lei para substituir a lei do movimento circular uniforme, e a sua variante ptolomaica que postulava um movimento uniforme em relação a um ponto equante (KUHN, 1990, DEBUS, 1996).

Analisando o movimento da Terra, Kepler encontra uma órbita próxima de um círculo, com o Sol levemente deslocado do centro. Pôde constatar então que a velocidade da Terra é maior no periélio do que no Afélio, e que o mesmo fenômeno parece ocorrer em Marte. Assim, com base em sua lei de velocidade, demonstra que nessas extremidades da órbita a velocidade do planeta é inversamente proporcional à sua distância ao Sol. A seguir, generaliza este resultado para outros pontos da trajetória. Comete um erro neste procedimento, pois a lei da velocidade, só é válida nas extremidades da órbita. Entretanto, curiosamente, este equívoco, combinado com outros, termina por conduzi-lo ao resultado correto, o qual é hoje conhecido como lei das áreas, ou segunda lei de Kepler para o movimento planetário: a linha que liga o planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais (MOURÃO, 2003).

Uma vez formulada a lei das áreas, Kepler retorna ao problema da órbita de Marte. Neste novo esforço se vê forçado rejeitar o movimento circular. Passa a experimentar várias ovas, até descobrir que a órbita de Marte poderia ser descrita por uma elipse. Posteriormente generaliza este resultado, postulando que esta curva também era reproduzida pelos demais planetas. Esta é a lei das órbitas elípticas, ou primeira lei Kepler.

Quando as elipses substituem as órbitas básicas circulares comuns à astronomia de Ptolomeu e de Copérnico e quando a lei de áreas iguais substitui a do movimento uniforme à volta de um ponto ou de um centro próximo, todas as necessidades de excêntricos, epiciclos equantos e outros dispositivos *ad hoc* desaparecem. Pela primeira

vez, uma única curva geométrica simples e uma única lei da velocidade são suficientes para prever a posição planetária, e pela primeira vez as predições são tão exatas como as observações (KUHN, 1990, p. 245).

A duas primeiras leis do movimento planetário foram publicadas por Kepler em 1609, em seu livro *Astronomia Nova*. O longo processo de interação entre os pressupostos teóricos e filosóficos de Kepler e a precisão dos dados observacionais, exemplifica um novo tipo de atitude diante dos fatos, que se tornará uma marca distintiva da ciência moderna.

O árduo esforço empreendido por Kepler, alimentado por suas convicções neoplatônicas, para descobrir as harmonias matemáticas subjacentes ao modelo copernicano, consolidando a nova astronomia heliocêntrica, ainda produziria mais um resultado significativo, a lei dos períodos ou, terceira lei de Kepler: a razão entre os quadrados dos períodos de revolução de dois planetas quaisquer é igual à razão dos cubos de suas distâncias médias ao Sol.

A terceira lei foi publicada em 1619, no livro *Harmonices mundi* (Harmonia dos mundos). Sua elaboração não pode ser dissociada do esforço de Kepler em relacionar as velocidades dos planetas ao longo de suas órbitas, às notas musicais, o que sugeriria que os planetas em seu movimento orbital executariam uma espécie de “música celestial”. (BURTT, 1983). A obtenção da terceira lei mais uma vez evidencia o papel seminal que a crença nas várias harmonias teve ao longo de todo o trabalho de Kepler (KUHN, 1990, p.249).

Com as leis do movimento planetário Kepler amplia consideravelmente o alcance do modelo copernicano. O exaustivo trabalho que levou às suas formulações foi orientado pela ideia mestra de que o Sol não era apenas o centro geométrico do universo, mas a causa física dos movimentos planetários, configurando assim os primeiros esforços, no sentido de construção de uma física celeste. Como salienta Koyré:

Se o Sol se acha no centro do mundo, é preciso que os movimentos dos planetas não sejam ordenados em relação a ele de uma maneira geométrica ou ótica - como em Copérnico -, mas também de uma maneira física e dinâmica. O esforço de Kepler é, assim, o de encontrar, não apenas uma concepção astronômica que permita

ordenar e “preservar” os fenômenos, mais ainda uma concepção física que permita explicar, por causas físicas, o movimento real dos corpos celestes no mundo (KOYRÉ, 1991, p. 88).

4.5 GALILEU GALILEI

4.5.1 As observações telescópicas e a defesa do copernicanismo

Em 1609, Galileu Galilei (1564-1642), contemporâneo de Kepler e também copernicano, tem notícia da invenção do telescópio, e resolve ele mesmo desenvolver o seu e apontá-lo para o céu. Com isso transforma o novo invento que, até então, era uma simples curiosidade, em um poderoso instrumento científico. Em pouco tempo emerge de suas observações uma série de notáveis descobertas que inauguram um período marcado por uma intensa efervescência intelectual, grandes polêmicas científicas e atritos pessoais. As observações telescópicas de Galileu, interpretadas à luz da teoria copernicana e articuladas a uma convincente e corrosiva verve literária - capaz de atrair aliados e desautorizar adversários - contribuíram de forma decisiva para a completa dissolução do cosmos aristotélico e gradual aceitação do modelo copernicano. Como salienta Kuhn:

O telescópio de Galileu mudou os termos do enigma que o céu apresentava para os astrônomos, e isso tornou o enigma bastante mais fácil de resolver, pois nas mãos de Galileu, o telescópio revelava provas infindáveis em favor do Copernicanismo (KUHN, 1990, p.252).

Em 1610, Galileu publica o opúsculo *Sidereus nuncius* (A mensagem das estrelas), no qual comunica as descobertas realizadas nas observações com o telescópio. Este pequeno livro causou um grande impacto na comunidade intelectual da Europa, tornando-se uma importante referência para aqueles que defendiam o sistema copernicano e, ao mesmo tempo, despertando a ira dos filósofos e religiosos mais conservadores que não admitiam a mutabilidade do cosmo ou a teoria heliocêntrica.

As observações pelo telescópio, logo revelaram a existência de corpos celestes nunca antes imaginados. As nebulosas e a Via Láctea eram formadas por inúmeras estrelas que guardavam uma grande distância entre si. Como destaca Galileu:

A Galáxia não é pois outra coisa que um conglomerado de inumeráveis estrelas reunidas em nuvens. A qualquer região que dirija o óculo imediatamente se apresenta á vista uma enorme quantidade de estrelas, algumas das quais parecem bem grandes e conspícuas, se bem que fica completamente incalculável o número de pequenas (GALILEI, 1987, p.55).

Subitamente os céus imutáveis sofreram uma grande expansão, o número de estrelas das constelações mais populosas aumentou consideravelmente. Curiosamente, o universo exibido pelo telescópio, de certa forma, correspondia à expectativa dos copernicanos mais radicais.

A vasta expansão do universo, talvez a sua infinidade, postulada por alguns dos copernicanos, parecia subitamente mais razoável. A visão mística de Bruno de um universo cuja extensão e população infinitas proclamavam a infinita criatividade da Divindade estava quase transformada num dado observável (KUHN, 1990, p.253).

O telescópio também possibilitou a descoberta de novidades mesmo quando era apontado para objetos celestes familiares, como o Sol, a Lua e os planetas. Assim, ao observar a Lua descobriu que a sua superfície apresentava irregularidades como, crateras, buracos, vales e montanhas; ou seja, a sua superfície não era lisa e perfeitamente esférica, como imaginavam os filósofos aristotélicos (KUHN, 1990).

Ao investigar o planeta Júpiter, Galileu notou a presença de quatro “estrelinhas” muito brilhantes que o acompanhavam o planeta em seu movimento. Inicialmente observou apenas três pontos luminosos que julgou serem estrelas; contudo, observações realizadas em noites sucessivas revelaram a existência de um quarto ponto luminoso, e que esses pontos continuamente reajustavam as suas posições relativas. Inferiu então, que se tratava de satélites orbitando em torno de Júpiter. Essa descoberta revelava àqueles que defendiam a Terra com o centro do Universo a existência de outros centros de rotação para os corpos celestes. Ao mesmo tempo, para os copernicanos, Júpiter e seus satélites exemplificavam um sistema solar em miniatura (COHEN, 1988).

Em trabalhos posteriores novas descobertas são apresentadas, fornecendo novos argumentos a favor do copernicanismo. As observações telescópicas do Sol revelaram imperfeições, manchas negras que apareciam e desapareciam sobre a sua superfície. Galileu interpretou o movimento das manchas no disco solar como um indício de que o Sol girava em torno de seu próprio eixo. As manchas solares, assim como as irregularidades da Lua forneciam novas evidências, após as observações de Tycho Brahe e seus contemporâneos, de que a tradicional distinção entre o mundo sublunar - imperfeito e corruptível - e o mundo supralunar - perfeito e imutável - tornara-se inadequada. Além disso, a rotação do Sol fornecia um exemplar visível para a rotação axial da Terra (KUNH, 1990).

As observações das fases de Vênus foram outro marco na defesa do copernicanismo, pois forneceram evidências que podiam ser diretamente vinculadas a teoria astronômica de Copérnico. Se a órbita de Vênus resultasse da combinação de um epiciclo móvel e um deferente centrado na Terra, como afirmava o modelo de Ptolomeu, este planeta deveria aparecer sempre da mesma forma, como um crescente iluminado. Em contrapartida, as fases de Vênus corroboravam a hipótese copernicana de que este planeta orbitava em torno do Sol.

O telescópio de Galileu forneceu evidências significativas para a superação da crença na imutabilidade do cosmos, o que, sem dúvida, contribuía para uma maior aceitação do copernicanismo. Contudo, em geral essas observações não estavam diretamente vinculadas à teoria de Copérnico. As observações telescópicas por si só não corroboram o modelo de Copérnico. Segundo Kuhn:

Para os que dispunham de iniciação astronômica, as provas do telescópio eram, talvez supérfluas. As Leis de Kepler e as suas Tabelas Rudolfinas teriam sido também, embora muito mais lentamente, eficazes. Mas não foi nos iniciados astronomicamente que o telescópio teve o maior impacto. O primeiro papel único do telescópio era fornecer documentação geralmente acessível e não matemática para o ponto de vista copernicano (KUNH, 1990, p.257).

Nas mãos de Galileu o telescópio transformou-se em um poderoso instrumento de persuasão acerca da validade do sistema de Copérnico. Com o telescópio, a astronomia copernicana deixa de ser

um tema acessível apenas aos filósofos e astrônomos matemáticos. Galileu foi um grande divulgador da astronomia, da astronomia copernicana evidentemente.

4.5.2 A nova ciência do movimento – preâmbulo de uma física inercial

As leis de Kepler para o movimento planetário e as descobertas telescópicas de Galileu deram uma nova dimensão à teoria de Copérnico, tornando urgente para os seus defensores a necessidade de elaboração de uma nova física. Embora Kepler tenha articulado em seu trabalho teórico a ideia de que algum tipo de força deveria conduzir os planetas ao redor do Sol, o fato é que o sistema copernicano continuava a carecer de uma física que lhe desse sustentação.

Galileu não concentrará os seus esforços teóricos na perspectiva de construir uma física celeste propriamente dita. Contudo, na continuidade de seu trabalho de investigação do movimento local, construirá importantes argumentos teóricos para coadunar as suas conclusões sobre a queda dos corpos e o movimento dos projéteis com a hipótese de uma Terra móvel. Na elaboração de sua física do movimento local Galileu não perde de vista a necessária coerência entre esta e um universo copernicano.

O estudo da queda dos corpos tem um papel central no esforço de construção da física galileana. Como enfatiza Koyré:

A física de Galileu é uma física dos graves. Uma física dos corpos que caem. Que vão para baixo. É por isso que o movimento de queda nela desempenha um papel de primeira importância. Esse papel digamo-lo desde já, é tal que a poderíamos definir assim: uma física de queda (KOYRÉ, 1992, p. 297).

Ao longo de sua trajetória científica as ideias de Galileu sobre o movimento sofrem uma grande transformação. De teórico do impetus, herdeiro da tradição medieval, nos tempos de juventude, ao Galileu maduro, que supera a concepção antiga e medieval de que, para haver movimento é necessária a presença de um motor, seja este o meio externo, a força impressa ou o impetus absorvido pelo corpo. Com isso anuncia, ainda que de forma incompleta, uma primeira ideia do princípio de inércia.

A influência dos filósofos medievais sobre o trabalho de Galileu foi destacada no início do século XX pelo físico, filósofo e historiador da ciência francês Pierre Duhem. Dentre os desenvolvimentos da física medieval que influenciaram Galileu merece destaque os trabalhos realizados em meados do século XIV pelos estudiosos da universidade de Paris, Jean Buridan (1297-1358) e Nicole d'Oresme (1320-1382), e as pesquisas desenvolvidas no Merton College em Oxford (ZYLBERSZTAJN, 1998; DIAS; SANTOS; SOUZA, 2004).

Uma importante contribuição à compreensão dos aspectos cinemáticos do movimento foi dada pelos estudiosos do Merton College. Estes, ao analisarem o movimento uniforme e o movimento uniformemente variado, enunciaram a chamada “regra da velocidade média”. Esta regra afirma que, para um mesmo intervalo de tempo, a distância percorrida por um corpo em movimento retilíneo uniformemente acelerado é equivalente àquela percorrida em movimento retilíneo uniforme com velocidade igual à média das velocidades inicial e final no primeiro movimento. Oresme obteve uma demonstração geométrica da regra da velocidade média, ao representar o movimento uniforme por um retângulo e um movimento uniformemente acelerado por um triângulo retângulo, uma técnica semelhante aos atuais diagramas $v \times t$, utilizados na cinemática (COHEN, 1988).

Ao estudar o movimento de queda dos graves, Galileu utilizou, de forma original, as técnicas desenvolvidas por Oresme e pelos estudiosos do Merton College. Contudo, este diálogo de Galileu com os seus predecessores não pode ser interpretado apenas como esforço de continuidade da física medieval. Para aqueles estudiosos, as conclusões obtidas para o movimento uniformemente variado são apenas engenhosos exercícios intelectuais, sem vínculos com a realidade. Em contrapartida, Galileu utilizou esses resultados anteriores no âmbito de uma nova forma de investigação da natureza, marcada por um profícuo diálogo entre “as abstrações matemáticas e o mundo da experiência” (COHEN, 1988, p. 137).

Em sintonia com as suas convicções platônicas de que a natureza é matematizável, Galileu toma como ponto de partida de sua análise da queda dos corpos que este movimento deve se efetuar da forma mais simples possível, ou seja, ele deve ser um movimento retilíneo uniformemente variado. Na continuidade de suas pesquisas Galileu obteve as leis matemáticas para a queda livre e o lançamento de projéteis (KOYRÉ, 1992).

Foi no âmbito desses estudos sobre o movimento local que Galileu chegou a uma primeira ideia de que poderia haver o movimento

de um corpo sem a presença de um agente motor. Isto pode ser evidenciado em uma passagem do “Diálogo sobre os Dois Principais Sistemas do Mundo: O Ptolomaico e o Copernicano”. Nessa passagem os personagens Simplício e Salviati discutem o movimento de um corpo perfeitamente esférico, ao longo de um plano inclinado perfeitamente liso. Através desses dois personagens Galileu explica que, ao longo de um declive um corpo espontaneamente se movimenta de modo continuamente acelerado; esta aceleração cresce, conforme se aumenta a inclinação do plano. Para impedir este movimento, mantendo o corpo em repouso, é necessário o uso de uma força. Em relação a um aclave, verifica-se que o corpo não sobe espontaneamente, a menos que sobre ele se exerça uma força, ou que ele seja arremessado ao longo do plano. Neste caso, o corpo realiza um movimento continuamente retardado, sendo que novamente o módulo da variação de velocidade cresce com a inclinação do plano (COHEN, 1988; DIAS; SANTOS; SOUZA, 2004).

A ideia de inércia emerge quando Salviati conduz a discussão para a análise do movimento ao longo de uma superfície horizontal. Esse trecho é reproduzido a seguir:

Salviati: [...]. Agora, diga-me o que aconteceria, se o mesmo corpo em movimento fosse colocado numa superfície sem aclave ou declive [plana].

Simplício: [...]. Não havendo declive, não haveria tendência natural ao movimento; não havendo aclave, não haveria resistência a ser movido. Assim, haveria uma indiferença quanto à propensão e à resistência ao movimento. Parece-me que a bola deveria permanecer naturalmente estável. [...].

Salviati: [...]. Acho que isso é o que aconteceria, se a bola fosse colocada firmemente. Mas o que aconteceria, se fosse dado à esfera um impulso, em qualquer direção?

Simplício: Deve ser concluído que ela se moveria naquela direção.

Salviati: Mas com que tipo de movimento? Um continuamente acelerado, como no declive, ou um continuamente retardado, como no aclave?

Simplício: Não havendo aclave ou declive, não posso ver uma causa para desaceleração ou aceleração.

Salviati: Exatamente. Mas, se não existe causa para a retardação da bola, deve haver ainda menos

[causa] para que venha ao repouso; assim, até onde você supõe que a bola se moveria?

Simplício: Tão longe quanto a extensão da superfície continuasse sem se levantar ou abaixar.

Salviati: Então, se tal espaço fosse ilimitado, o movimento nele seria, da mesma forma, ilimitado? Isto é, perpetuo?

Simplício: Assim parece-me [...] (apud DIAS ; SANTOS ; SOUZA, 2004, p.261 - 262).

A citação acima parece indicar que Galileu chegou à forma atual do princípio da inércia, tal como enunciado por Newton. Todavia, na continuidade do diálogo Salviati indaga sobre a causa do comportamento da esfera em um plano inclinado, enfatizando em seguida que se deve entender por uma superfície sem aclave ou declive:

Salviati: Agora, diga-me, o que você considera ser a causa da bola se mover espontaneamente, quando em declive, e somente forçadamente, quando em aclave?

Simplício: Que a tendência dos corpos pesados é de se mover para o centro da Terra e de se mover para cima, a partir de sua circunferência, somente [forçadamente]; ora, a superfície em declive é a que se aproxima do centro [da Terra], enquanto que aquela em aclave se afasta para longe [do centro da Terra].

Salviati: Então para que uma superfície não esteja nem em aclave e nem em declive, todas as suas partes devem ser igualmente distantes do centro. Existe tal superfície no mundo?

Simplício: Muitas delas; tal seria a superfície de nosso globo terrestre, se ele fosse liso e não ondulado e montanhoso, como é. [...] (apud DIAS; SANTOS; SOUZA, 2004, p.261; 262).

Assim, percebe-se ao final dessa citação a compreensão que Galileu tinha acerca do movimento ao longo de um plano ilimitado. No limite, tal movimento reduz-se àquele efetuado ao longo de uma circunferência de uma esfera ideal, com as dimensões da Terra. Galileu exemplifica tal situação com um navio navegando em águas tranquilas; uma vez que o navio recebesse um impulso numa certa direção e não havendo obstáculos externos ou acidentes, ele continuaria a se

movimentar uniformemente. Esta passagem revela, de forma inequívoca, que Galileu chegou próximo do princípio de inércia, mas não conseguiu formulá-lo, em sua forma atual, concebendo uma espécie de inércia não linear (COHEN, 1988).

A ideia de inércia também pode ser evidenciada na análise do movimento de queda de um corpo a partir de grandes alturas. Galileu considerou que a resistência do ar deveria aumentar numa certa proporção da velocidade, de forma que, para um corpo caindo de grandes alturas, quando a resistência igualasse o peso o corpo cairia em movimento uniforme. Este resultado é antiaristotélico, pois, de acordo com a física de Aristóteles, quando a resistência do ar igualasse o peso o corpo deveria parar (COHEN, 1988).

Outra aproximação do princípio de inércia ocorre na análise do movimento de um projétil. Galileu postulou que, em uma situação ideal, o movimento do projétil resultava da combinação de dois movimentos mutuamente independentes: um movimento uniforme na horizontal e um movimento naturalmente acelerado na vertical. Assim, conseguiu demonstrar matematicamente que a trajetória deveria ser uma parábola. Como se percebe, Galileu concebe o movimento horizontal como um movimento inercial.

Uma das limitações da inércia galileana pode ser associada à própria característica do objeto de investigação de Galileu, qual seja, o movimento local que ocorre sempre sob a influência da gravidade (KOYRÉ, 1992). Além disso, na perspectiva conceitual galileana, é preciso explicar o movimento de queda dos graves e o movimento dos projéteis, de tal forma que as conclusões obtidas sob a hipótese de uma Terra móvel coincidam com aquelas obtidas para uma Terra fixa. **Portanto**, em uma Terra girante, quando um corpo cai de uma torre ele acompanha a Terra em seu movimento de rotação, assim como o corpo que cai do mastro de um navio que se encontra em movimento uniforme. Com este procedimento Galileu procura construir uma física para uma Terra que gira, concebendo assim uma espécie de inércia circular (COHEN, 1988).

Pode-se apontar também como limitação da inércia galileana, a crença de Galileu em um universo finito (KOYRÉ, 1992). Nos Diálogos Sobre os Dois principais Sistemas do Mundo, Galileu explicita a sua posição sobre a possibilidade de uma inércia retilínea:

[...] sendo o movimento retilíneo por natureza infinito (porque uma linha recta é infinita e indeterminada), é impossível que alguma coisa

possa ter por natureza o princípio do movimento rectilíneo; ou, por outras palavras, que se mova em direcção a um lugar onde é impossível chegar, não havendo fim finito (apud COHEN, 1988, p.155).

Um outro aspecto limitante da inércia galileana reside no apego de Galileu ao princípio da circularidade do movimento dos astros. É importante destacar que apesar de Galileu ser contemporâneo de Kepler, tendo inclusive trocado cartas com este, ele não aceitou a ideia das órbitas elípticas. Em relação ao obstáculo representado pelo dogma da circularidade, Koyré observa:

Foi dito algumas vezes, e nós mesmos o dissemos, que o caminho para o princípio de inércia estava, para Galileu, obstruído pela experiência astronômica do movimento circular dos planetas, movimento inexplicável e, portanto, eminentemente, “natural”. Isto parece-nos incontestável. [...], a física celeste encontrava-se plenamente de acordo com a física terrestre: pois esta, inteiramente baseada numa concepção dinâmica da gravidade, fonte do movimento e propriedade constitutiva e inadmissível dos seus corpos, não podia admitir o carácter privilegiado do movimento rectilíneo (KOYRÉ, 1992, p.320).

Contudo, malgrado as limitações da inércia galileana, condicionadas pelo papel desempenhado pela gravidade, pelo dogma da circularidade e pela finitude do universo copernicano-galileano, este conceito, ao ser ressignificado por Descartes e Gassendi, ocupará um lugar de destaque na construção da mecânica newtoniana e na formulação da lei da gravitação universal.

4.6 RENÉ DESCARTES

Na primeira metade do século XVII, como resultado das lentas transformações científicas e culturais que ocorreram ao longo do século XVI, emergem os principais trabalhos de Kepler e Galileu, evidenciando um universo muito mais amplo do que aquele delineado pela cosmologia aristotélica e anunciando as potencialidades de uma nova

física, assentada no uso da racionalidade matemática e da experimentação.

Esses desenvolvimentos científicos, ao lado das grandes transformações políticas, econômicas e sociais, que ocorriam na Europa, tais como a descobertas de novos povos, o desenvolvimento de novas técnicas de manufaturas, de plantio, de navegação, etc., tornavam evidentes para muitos estudiosos, a necessidade de uma nova filosofia, que estivesse em sintonia com este novo mundo, rompendo definitivamente com as forma arcaicas de pensamento, representadas pela filosofia aristotélico-escolástica. É nesse cenário de ceticismo em relação à tradição filosófica hegemônica, e ao mesmo tempo de perplexidade diante das novas descobertas, que René Descartes (1596-1650) propõe a construção de uma nova filosofia da natureza, que rompesse definitivamente com os dogmas herdados e mantidos pela tradição escolástica.

Para Descartes era imprescindível abandonar por completo todo o saber anterior, fazendo uso sistemático da dúvida no processo de busca da verdade: “Para examinar a verdade, é necessário, ao menos uma vez no curso de nossa vida, duvidar, o mais possível, de todas as coisas” (DESCARTES, 2007, p.26). Era necessário examinar criticamente todos os conhecimentos já sedimentados pela tradição, aceitando como axiomas fundamentais a existência de Deus e a realidade da própria existência: “Por conseguinte, o conhecimento PENSO, LOGO EXISTO, é o primeiro e mais certo que se apresenta àquele que filosofa ordenadamente” (DESCARTES 2007, P.27).

O uso da razão permitiria inferir a existência de Deus, e a partir da compreensão deste fundamento seria possível deduzir todo o universo e as leis que o regiam. Esta nova filosofia baseada no uso da razão tinha na matemática o principal instrumento para conhecer e dominar a natureza. Descartes, como salienta Debus:

Acreditava que cada um dos passos desse método, inspirado na matemática, seria tão certo como as demonstrações da geometria euclidiana. Por isso, não é de se estranhar que tivera tanto êxito em seu estudo da óptica, do arco íris e da geometria analítica. Estes temas eram essencialmente matemáticos e essa era a forma mais adequada de tratá-los (DEBUS, 1996).

A nova filosofia da natureza proposta por Descartes – o mecanicismo - procurava explicar os mecanismos causais da natureza a partir das qualidades geométricas da matéria e do movimento. A matéria era considerada inerte, passiva, despida de qualidades ocultas, ou princípios ativos. Para explicar o mundo físico apenas as causas eficientes eram importantes. As causas finais, e toda a sorte de explicações teleológicas, que compunham a filosofia aristotélica, tornavam-se irrelevantes (BARRA, 2003).

Em 1633, Descartes estava concluindo o livro *Traité du Monde et de La Lumière* (Tratado do Mundo e da Luz), quando soube da condenação de Galileu, pela inquisição, motivada por uma tese, ao qual ele também havia aderido: a do movimento da Terra. Com receio de que o seu livro despertasse uma reação semelhante, estrategicamente, desistiu de publicá-lo. Este episódio deixará marcas profundas no espírito de Descartes, com reflexos visíveis em sua produção científica e filosófica ulterior. Como observa Pessanha:

E por prudência (que alguns críticos considerarão às vezes excessiva), toda a obra posterior do filósofo ficará até certo ponto mutilada ou deformada: Descartes apresentar-se-á como um “filósofo mascarado” (segundo sua própria expressão), passando a se exprimir de forma freqüentemente embaçada e ambígua, para garantir a tranqüilidade de sua vida e evitar a repressão da Igreja (PESSANHA, 1983, p. XIII).

Em 1637, Descartes publica o Discurso do Método, obra que servia de introdução a outros tratados mais extensos como, os Meteoros (que incluía os seus estudos sobre o arco-íris) a Dióptrica (em que tratava do fenômeno da visão, as lentes, e a lei da refração) e a Geometria (em que desenvolvia a geometria analítica) (DEBUS, 1996). No Discurso Descartes apresenta, de forma concisa e alegórica, algumas de suas ideias sobre a criação do universo.

Também, para sombrear um pouco todas essas coisas e poder dizer mais livremente o que julgava a seu respeito, sem ser obrigado a seguir nem a refutar as opiniões aceitas entre os doutos, resolvi-me a deixar todo esse mundo às suas disputas, e a falar somente do que aconteceria num novo, se Deus criasse agora em qualquer parte, nos espaços

imaginários, bastante matéria para compô-lo, e se agitasse diversamente, e sem ordem, às diversas partes desta matéria, de modo que compusesse com ela um caos tão confuso quanto os poetas possam fazer crer, e que, em seguida, não fizesse outra coisa senão prestar o seu concurso comum à natureza, e deixá-la agir segundo as leis por ele estabelecidas (DESCARTES, 1983. p.52).

Estas ideias reaparecem de forma mais elaborada nos Princípios da Filosofia, publicado em 1644. Nesta obra Descartes expõe, de forma ambiciosa, o seu projeto de construção de uma física universal e de uma nova filosofia da natureza, norteadas pela racionalidade matemática, e cujos pressupostos fundamentais se originam na metafísica.

Assim, toda Filosofia é como uma árvore, de que a Metafísica é a raiz, a Física o tronco, e todas as outras ciências, os ramos que crescem desse tronco, que se reduzem a três principais: a Medicina, a Mecânica e a Ética (DESCARTES, 2007, p. 17).

Na filosofia cartesiana física e metafísica estão indissociavelmente ligadas, podendo-se interpretar a sua física como, uma aplicação de sua metafísica. Neste quadro conceitual as qualidades essenciais da matéria são: extensão e movimento. Essas duas qualidades são conjuntamente associadas a um corpo através do conceito de quantidade de movimento.

O universo cartesiano é indefinido em sua extensão, sendo totalmente preenchido pela matéria. Não existe o vazio, matéria e espaço são concebidos como entidades idênticas; os corpos não se situam no espaço, mas entre outros corpos (KOYRÉ, 1979). Neste universo o conceito de quantidade de movimento tem um papel central. As diferentes partes da matéria movimentam-se incessantemente entre si e colidem umas com as outras, alterando as suas respectivas quantidades de movimento. Contudo, essas colisões obedecem a um princípio fundamental, o de que a quantidade de movimento total do universo é constante.

4.6.1 A conservação da quantidade de movimento e o princípio de inércia

É na metafísica que Descartes encontra o princípio fundamental da dinâmica do universo: “Deus é a primeira causa do movimento e possui sempre a mesma quantidade no universo” (DESCARTES, 2007, p.76). O movimento, por sua vez, está submetido a três leis, assumidas por Descartes como leis da natureza.

A primeira lei da natureza: cada coisa permanece no seu estado se nada o alterar; assim, aquilo, que uma vez foi posto em movimento continuará sempre a mover-se.

A segunda lei da natureza: todo corpo que se move tende a continuar o seu movimento em linha reta.

A terceira lei: se um corpo que se move encontrar outro mais forte, o seu movimento não diminui em nada; se encontrar um corpo mais fraco, que consiga mover, só perderá o movimento que lhe transmitir (DESCARTES 2007, p.77; 78; 79).

Com a primeira lei, Descartes estabelece o repouso e o movimento como estados da matéria. A matéria não tem o atributo de ir para algum lugar definido, como ocorria na física aristotélica. A matéria só entra em movimento, se forçada por algum agente externo. A segunda lei complementa a primeira, explicitando como se daria o movimento, na ausência de colisões. Ambas as leis constituem uma clara antecipação do princípio de inércia, já nos moldes formulados posteriormente por Newton.

Assim, na física cartesiana o princípio da inércia, em sua forma retilínea, emerge claramente do princípio de conservação da quantidade de movimento. Contudo, ele não se verifica no mundo real, que é pleno. O movimento inercial, só se seria possível se existisse o vazio, um conceito inexistente na física cartesiana (KOYRÉ, 1992).

4.6.2 A gravidade na física cartesiana

Nos Princípios da Filosofia Descartes desenvolve uma cosmogonia, na qual os movimentos celestes e a queda dos corpos na Terra podem ser explicados, segundo um modelo mecânico (DESCARTES, 2007).

O universo cartesiano é concebido como tendo sido criado pela vontade de Deus. No início havia apenas uma matéria homogênea, sólida, impenetrável e imóvel, preenchendo todo o espaço. Deus então, através de seu poder infinito, concedeu movimento à matéria, fazendo com que as suas diferentes partes girassem entre si, fragmentando-se em uma imensa variedade de formas, tamanhos e movimentos. A partir deste movimento inicial conferido pelo criador ele não mais interviria no universo, cuja matéria, inicialmente sob um movimento caótico, se organizaria segundo leis imutáveis por ele fixadas. Em função dos sucessivos choques e quebras da matéria primordial surgiram três tipos de matéria, ou elementos (MARTINS, 1998).

Toda a matéria do universo, resultante da fragmentação da matéria primordial, organizou-se sob a forma de grandes turbilhões ou vórtices. No centro de cada turbilhão se aglutinou a matéria mais sutil, o fogo (primeiro elemento), que formaria as estrelas. Na circunvizinhança de cada estrela haveria um turbilhão de matéria, líquida, transparente e invisível, formada por partículas esféricas muito pequenas (segundo elemento, ar). Este turbilhão de partículas do segundo elemento, cujos interstícios seriam ocupados pelas partículas do primeiro, empurraria os planetas em torno de suas órbitas. Por sua vez, as partículas mais sólidas (terceiro elemento, terra) formariam os planetas e os cometas (PEDUZZI, 2008b).

Nesse engenhoso mecanismo de turbilhões (Figura 4), cada planeta deve girar em torno do Sol em uma região na qual as partículas do segundo elemento possuem o mesmo grau de “força” que o planeta. Se o planeta se aproxima do centro do turbilhão ele passa a interagir com partículas menores, mas que tem um maior grau de “força”. Isto torna o planeta mais rápido, e ele se afasta do centro; ao fazê-lo o planeta penetra em uma região de partículas maiores e mais lentas, que o tornam mais lento. Então o planeta perde movimento e se aproxima novamente do centro. Consequentemente, ao longo de sua órbita, o planeta, se aproxima e se afasta do centro, oscilando em torno de uma distância média. Assim, se explicaria, qualitativamente, o fato das órbitas planetárias serem elípticas. Cada planeta, por sua vez, teria à sua volta um turbilhão secundário. Dessa forma, seria o vórtice da Terra que impulsionaria a Lua, assim como, o vórtice de Júpiter os seus satélites (MARTINS, 1994; PEDUZZI, 2008b).

Ao analisar o movimento de queda de corpo, Descartes argumentou que este se devia a interação do corpo com o turbilhão produzido pela própria Terra. Assim, quando um corpo era afastado da superfície da Terra ele interagiria com as partículas muito rápidas do

segundo e primeiro elemento, que o empurravam em direção à Terra. Assim, na física cartesiana a gravidade é decorrente do próprio turbilhão da Terra (MARTINS, 1998).

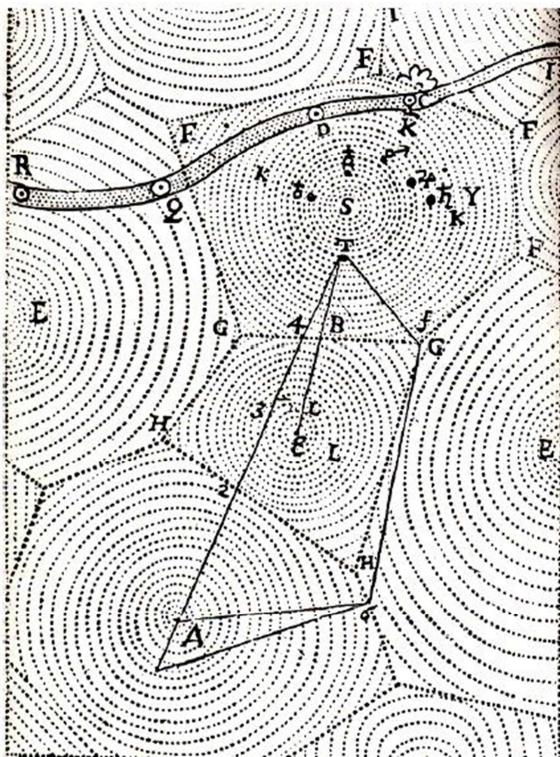


Figura 4 - Os vórtice de matéria no universo cartesiano

Fonte: Peduzzi (2008b, p.30).

Martins (1998) salienta que apesar da engenhosidade da explicação de Descartes, ela era problemática. Um das dificuldades dessa explicação residia em que se o vórtice terrestre girasse em torno do eixo da Terra, então a força de gravidade deveria apontar para este eixo e não para o centro. Christiaan Huygens (1629-1695), anos mais tarde, identificou essa dificuldade e aperfeiçoou a proposta de Descartes, ao postular que em torno da Terra havia um tipo de éter que circulava em torno do seu centro em todas as direções. Dada a simetria esférica

desses movimentos, a queda dos corpos se processaria segundo a direção do centro da Terra.

A filosofia mecanicista de Descartes exercerá uma grande influência entre os cientistas europeus, na segunda metade do século XVII. Em especial, o princípio de conservação da quantidade de movimento, despidido de seus aspectos metafísicos, motivará importantes pesquisas envolvendo a dinâmica das colisões (PEDUZZI, 2008b). Além disso, as ideias cartesianas serão intensamente estudadas pelo jovem Newton (WESTFALL, 1995). Posteriormente, Newton se tornará um ferrenho crítico da física e da metafísica cartesianas, demonstrando, por exemplo, a implausibilidade dos turbilhões, rejeitando a ideia de uma matéria inerte e de um Deus incapaz de intervir no funcionamento do universo (ABRANTES, 1998). Contudo, alguns avanços da física cartesiana serão ressignificados por Newton e incorporados à sua Mecânica, como o princípio de conservação da quantidade de movimento e o princípio da inércia. Além disso, a sua teoria de gravitação enfrentará uma série de objeções dos físicos cartesianos, pois implicava na possibilidade de uma ação à distância, o que era inconcebível nos cânones da física cartesiana, por suscitar à atribuição de qualidades ocultas à matéria, o que, para muitos, representava um retorno ao aristotelismo escolástico (ABRANTES, 1998).

4.7 ISAAC NEWTON E A GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

4.7.1 O contexto científico-filosófico encontrado pelo jovem Newton

Na primeira metade do século XVII, como resultado das lentas transformações científicas e culturais que ocorreram ao longo do século XVI, emergem os trabalhos seminais de Kepler (1571-1630), Galileu (1564-1642) e Descartes (1596-1650).

Na mecânica, Galileu havia dado uma nova vitalidade a antiga ciência do movimento ao matematizar com sucesso a queda dos graves, além de tornar obsoleta a ideia de ímpeto ao aventar, ainda que de forma incompleta, a possibilidade do movimento inercial.

Na astronomia, os esforços de Kepler no sentido de construir uma dinâmica para o sistema heliocêntrico de Copérnico não foram bem sucedidos, mas o conduziram à obtenção de suas três leis do movimento planetário que deram a este sistema uma maior clareza e funcionalidade. Além disso, as observações telescópicas de Galileu descortinaram para os seus contemporâneos um universo inimaginável dentro dos quadros

conceituais do aristotelismo escolástico, o que, sem dúvida, contribuiu para uma maior aceitação da teoria copernicana.

Esses progressos no campo da mecânica e da astronomia tornavam ainda mais evidente, para a emergente comunidade dos filósofos naturais, a necessidade de formulação de uma física capaz de responder adequadamente aos problemas suscitados pela teoria de Copérnico.

A hipótese da rotação diária e anual da Terra apresentava duas grandes dificuldades. A primeira era de natureza dinâmica: o que move a Terra e os demais planetas? A segunda relacionava-se à questão da gravidade. Segundo a concepção aristotélica, todos os corpos graves tendiam a cair para o centro do universo, ou seja, o centro da Terra. Com a aceitação de uma Terra planetária em movimento em torno do Sol, tal conceito não poderia ser mantido. Contudo, a experiência comum continuava a indicar que os graves caíam em direção ao centro da Terra.

Assim, o novo universo copernicano parecia exigir também um novo conceito de gravidade. Copérnico chegou a sugerir um novo conceito de gravidade, associado à uma espécie de princípio ativo inerente à matéria e compartilhado por outros corpos do universo. (BUTTERFIELD, 1992; KUHN, 1990).

A hipótese de uma Terra planetária tornava sem sentido o cosmos aristotélico e a sua tradicional distinção entre o mundo sublunar e o mundo supralunar. Para esses dois mundos havia duas físicas distintas. A teoria de Copérnico, embora não explicitasse, sugeria a existência de um único mundo, sujeito a uma única física.

Um importante passo no sentido superar a dicotomia entre os dois mundos e construir uma única física para os céus e a Terra foi dado por René Descartes. A física cartesiana está intimamente vinculada a uma nova filosofia baseada no uso da razão, e que tem na matemática o principal instrumento para conhecer e dominar a natureza.

A nova filosofia da natureza proposta por Descartes – o mecanicismo – procurava explicar os mecanismos causais da natureza, a partir das qualidades geométricas da matéria e do movimento.

O universo cartesiano é indefinido em sua extensão, sendo totalmente preenchido pela matéria. O conceito de quantidade de movimento tem um papel central neste Universo regendo as colisões das diferentes partes da matéria, que se movimentam incessantemente.

Além do mecanicismo cartesiano, uma outra vertente da filosofia mecânica começa a ganhar expressão e a se articular as pesquisas dos

filósofos naturais – o atomismo. Ao contrário de Descartes, os atomistas admitem a existência do vazio.

Na primeira metade do século XVII, o atomismo teve em Pierre Gassendi o seu principal divulgador. Contudo, influências atomistas podem ser encontradas nos trabalhos de Galileu e nos de seu discípulo Evangelista Torricelli, que desenvolveu o barômetro de Mercúrio (1608-1647). Ao lado do mecanicismo cartesiano, se bem que com um brilho menor, o atomismo exerceu uma considerável influência na filosofia natural do século XVII, aparecendo nos trabalhos de Robert Boyle (1627-1691) e em alguns trabalhos de Isaac Newton (1642-1727) (DEBUS, 1996; KUHN, 1990).

Na segunda metade do século XVII emerge uma nova geração de pensadores que encontra uma consistente base conceitual e metodológica para o prosseguimento dos trabalhos de investigação da natureza. Novas áreas da física começam a ganhar importância, mas o problema de uma nova física para a teoria copernicana ainda não havia sido satisfatoriamente resolvido. Robert Hooke, Christian Huygens, Christopher Wren e Robert Boyle são alguns dos herdeiros da revolução científica. A esta geração pertence Isaac Newton cujos trabalhos serão de importância seminal tanto para o florescimento das novas áreas da física, quanto para o desfecho do processo de construção de uma única física para os céus e a Terra.

4.7.2 A iniciação científica e filosófica do jovem Newton

Em 1661, o jovem Newton iniciou os seus estudos no Trynity College da Universidade de Cambridge. Ainda estudante no College, Newton demonstra um grande interesse pelas questões científicas e filosóficas suscitadas pelos trabalhos dos pensadores ligados à emergente filosofia natural, ou filosofia experimental. Por conta própria, à margem do currículo oficial, então fortemente marcado pelas concepções escolásticas, entra em contato com o pensamento de Descartes, tendo estudado atentamente algumas de suas obras. Teve também acesso ao atomismo de Gassendi. Leu o Diálogo sobre os dois principais sistemas do mundo, de Galileu, e ainda, Robert Boyle, Thomas Hobbes, Kenelm Digby, Joseph Glanville, Henry More e muitos outros, ilustres representantes da filosofia mecânica (WESTFALL, 1995).

Estimulado pelas questões levantadas por esses pensadores o jovem Newton empreende um ambicioso programa de estudos que em

poucos anos o põe na vanguarda das pesquisas científicas de seu tempo, nos campos da matemática, da mecânica, da óptica e da astronomia.

Na mecânica, ao estudar os Princípios da Filosofia de Descartes e os Diálogos de Galileu, Newton se depara com uma nova e radical concepção de movimento - o movimento inercial. Em Descartes, encontraria também dois problemas formulados e imperfeitamente respondidos: a mecânica do impacto, e mecânica do movimento circular. Esses dois problemas se tornariam o foco de sua investigação (WESTFALL, 1995, p. 46).

No âmbito da astronomia, Newton é introduzido à astronomia kepleriana através da obra *Astronomia Carolina*, de Thomas Street. Iniciam-se então as suas primeiras investigações relativas ao movimento celeste. Nessas primeiras incursões, ainda fortemente marcadas pela ideia dos vórtices cartesianos, articula as suas primeiras ideias sobre a dinâmica do movimento circular à investigação do movimento planetário e do movimento lunar (WESTFALL, 1995, p. 29; COHEN, 1983).

Em relação à astronomia kepleriana, é importante assinalar que na década de 1660 as leis de Kepler ainda não eram plenamente aceitas pela comunidade científica. Em verdade, apenas a terceira lei de Kepler possuía um bom grau de aceitação. A lei das órbitas elípticas, por exemplo, era enunciada corretamente nos livros de astronomia em 1670, mas nem sempre eram usadas em problemas práticos. A lei das áreas era, em larga medida, ignorada e substituída por esquemas geométrico alternativos como o equante, originalmente proposto por Kepler (COHEN, 1983, p. 248).

Contudo, apesar das dificuldades técnicas inerentes às leis de Kepler, que dificultavam tanto a sua aceitação quanto o seu efetivo uso prático, é inegável que elas estimulavam a busca de uma dinâmica para o movimento planetário, ao sugerirem o Sol como um centro de força que, de alguma forma, obrigava os planetas a executarem as suas órbitas. Nesta direção, o matemático Alfonso Borelli (1608-1679) defendia a existência de um equilíbrio de forças entre a força que, supostamente, emanava do Sol e a tendência centrífuga dos planetas (BUTTERFIELD, 1992, p.135).

4.7.3 As primeiras ideias de Newton sobre o movimento orbital e a terceira lei de Kepler

A ideia de que os planetas, em seu movimento orbital, possuíam uma tendência a se afastar do centro de força - o *conatus* - havia sido

apresentada por Descartes no, “Princípios da Filosofia”. Huygens se apropria dessa ideia e a utiliza em seus estudos do movimento circular, cunhando a expressão “força centrífuga”, para a qual obtém uma expressão matemática (COHEN, 1983; DESCARTES, 2007).

Por essa época, a compreensão que Newton tinha da dinâmica do movimento circular era fortemente ligada à ideia de *conatus*, compartilhada por Huygens e outros de seus contemporâneos. Trabalhando de forma independente de Huygens, Newton obtém por volta de 1665 uma expressão para esta “tendência a afastar-se do centro”, tendência, ou força centrífuga. Uma medida dessa força seria fornecida pela fórmula $f \propto \frac{v^2}{r}$, onde o segundo termo $\frac{v^2}{r}$ refere-se à

aceleração centrífuga. Logo, Newton estará usando esta expressão em suas primeiras incursões na análise do movimento orbital dos planetas e do movimento da Lua em torno da Terra (COHEN, 1983).

Em um manuscrito produzido por volta de 1667-1668, que é analisado por Cohen (1983, p.260-264), Newton utiliza a sua fórmula da aceleração centrífuga para calcular a “tendência” da Lua “para se afastar do centro” da Terra em seu movimento orbital e para obter uma lei planetária do inverso do quadrado da distância.

A tendência centrífuga é obtida mediante o cálculo da distância que seria percorrida por um corpo em movimento retilíneo ao longo da tangente à circunferência da Terra, no intervalo de tempo de uma revolução terrestre, supondo-se que esta tendência se exercesse ao longo desta tangente, sem nenhum impedimento. Em linhas gerais, a “tendência ao afastamento” é calculada através da aceleração, e esta mediante a lei de Galileu para um movimento com aceleração constante

($X = \frac{1}{2}at^2$, em linguagem atual). A seguir, Newton calcula de quanto

desceria um corpo se a sua tendência a aproximar-se do centro devido à gravidade fosse de mesma intensidade que a sua tendência a afastar-se, no equador, como resultado da rotação diária da Terra. Em um dia esta distância é estimada em $19\frac{3}{4}$ raios terrestres, que Newton calcula como 69.087 milhas italianas. Em um segundo essa distância é de $5/108$ pés ou $5/9$ polegadas². Ora, sob a ação da força de gravidade, em um segundo um corpo cairia de uma distância de 16 pés. Dessa forma, Newton obteve que a razão entre a força de gravidade e a tendência

²1 milha italiana = 5000 pés = 1000 passos; 1 milha inglesa = 5280 pés.

centrífuga era de 350/1, ou seja, na superfície da Terra a força de gravidade era cerca de 350 vezes mais intensa do que a tendência centrífuga (COHEN, 1983, p. 261; WESTFALL, 1995, p. 49).

Nesse mesmo documento, em um corolário, Newton enuncia a regra geral de que, “em diferentes círculos, as tendências a partir dos centros são como os diâmetros divididos pelos quadrados dos tempos de revolução ou como os diâmetros multiplicados pelos quadrados do número de revoluções realizadas em um tempo dado” (Newton, apud

COHEN, 1983, p.261), ou seja: $f \propto \frac{D}{T^2}$.

A regra $f \propto \frac{D}{T^2}$, é aplicada à comparação entre a “tendência” orbital da Lua “para afastar-se do centro” da Terra, com a tendência centrífuga sobre a superfície da Terra no equador. O valor obtido para a tendência centrífuga na superfície terrestre é cerca de 12 ½ vezes maior do que o valor da ‘tendência centrífuga’ da Lua. Ora, como a força de gravidade na superfície da Terra é cerca de 350 vezes o valor da tendência centrífuga na superfície da Terra, isto equivale a dizer que a força de gravidade sobre a superfície terrestre é 4375 (= 350 x 12 ½) vezes maior que a “tendência” da Lua a “afastar-se do centro da Terra”.

Mais adiante, retomando a expressão $f \propto \frac{D}{T^2}$ e levando em conta que, da terceira lei de Kepler, $T^2 \propto D^3$, ele encontra que $f \propto \frac{1}{D^2}$, ou simplesmente $f \propto \frac{1}{r^2}$. Assim, Newton obtém para os planetas uma lei do inverso do quadrado para as suas “tendências para se afastar” do Sol.

Retornando à proporção entre a força de gravidade na superfície da Terra e a tendência centrífuga da Lua, é interessante observar que, se Newton tivesse suposto que a proporção entre a “tendência” da Lua em “afastar-se do centro” da Terra e a força de gravidade na superfície terrestre é o inverso da razão entre o quadrado da distancia da Lua ao centro da Terra (60 raios terrestres) e o quadrado do raio terrestre, haveria um valor “teórico” de 3600.

Esse valor teórico de 3600 pode levar a crer que já nessa época Newton tenha chegado à conclusão de que a força de gravidade decresce com o inverso do quadrado da distância e que poderia, por exemplo, estender-se até a órbita da Lua, sendo que o Sol exerceria sobre os

planetas uma força de mesma natureza e sujeita à mesma lei. Estaria aí então, em “estado bruto”, a lei da gravitação universal que, após alguns refinamentos, Newton apresentaria à comunidade científica cerca de 20 anos depois.

Todavia, o valor encontrado por Newton estava bem distante do valor “teórico”, apresentando um erro de 21,5%. Além disso, não se deve perder de vista que aquilo que Newton efetivamente calcula é a tendência de afastamento da Lua do centro da Terra e não a sua distância de queda em um dado tempo. A perspectiva teórica privilegiada do leitor moderno pode induzi-lo à falsa interpretação desses cálculos como uma primeira demonstração da lei da gravitação universal. Como se buscará mostrar na próxima seção, as concepções teóricas de Newton nesta época não lhe permitiriam chegar à lei da gravitação universal.

4.7.4 A “prova da Lua”, a história da maçã e o surgimento do mito da descoberta precoce da gravitação universal

Por volta de 1718, já em idade avançada, referindo-se às suas primeiras incursões na análise do movimento planetário, realizadas entre 1665 e os primeiros anos da década de 1670, Newton escreveria:

[...] & no mesmo ano, [1666] comecei a pensar na gravidade como se estendendo até a órbita da Lua & (depois de descobrir como calcular a força com que [um] globo girando dentro de uma esfera pressiona a superfície da esfera), a partir da regra de Kepler de que os períodos dos planetas estão numa proporção sesquiáltera com suas distâncias do centro de suas órbitas, deduzi que as forças que mantêm os planetas em suas órbitas devem [variar], reciprocamente, como o quadrado de sua distância do centro em torno do qual eles giram: & a partir disso, comparei a força necessária para manter a Lua em sua órbita com a força da gravidade na superfície da Terra, & descobri que elas se correspondem bem de perto [...]
(NEWTON, apud WESTFALL, 1995, p. 39).

Este documento também é analisado por Cohen (1983), que ao confrontá-lo com vários dos escritos produzidos por Newton em sua

juventude chama a atenção para algumas incongruências entre o teor deste documento e as concepções teóricas de Newton naquele período:

Toda esta descrição é típica das versões montadas por Newton, especialmente nos anos que se situam entre 1715 e 1718, quando se achava profundamente imerso em controvérsias acerca de problemas de método e prioridade nas descobertas. Neste caso, o primeiro problema que enfrenta o historiador crítico é o de que, nos anos da década de 1660, Newton ainda considerava o movimento dos planetas em órbita ou o de seus satélites (e nossa Lua) em termos de um conceito derivado de seus estudos de Descartes, um '*conatus recedendi* a centro', ou uma 'tendência a afastar-se do centro' (COHEN, 1983, p. 253).

É importante observar que, à época, Newton ainda não compreendia o movimento orbital como uma composição de um movimento acelerado para um corpo central e um movimento inercial tangencial à órbita. A ideia de uma força centrípeta a desviar continuamente o planeta de um movimento retilíneo, mantendo-o em sua órbita, sequer passava pela mente do jovem Newton. É só a partir de sua troca de cartas com Robert Hooke, nos anos de 1679-1680, que ele, ao assimilar esta compreensão da dinâmica do movimento curvilíneo, passará a conceber a existência de uma força central a desviar os planetas. Só então, com o "nascimento" da força centrípeta, pode-se afirmar que Newton encontra uma abordagem adequada do problema que efetivamente lhe permite, ao longo dos próximos anos, gestar a ideia de uma força de gravitação universal (COHEN, 1983, 1988; WESTFALL, 1995).

Retornando ao manuscrito de 1667-1668, Cohen (1983, p.262) destaca os resultados obtidos por Newton. Combinando a regra da tendência centrífuga para os planetas com a terceira lei de Kepler ele deriva uma lei do inverso do quadrado para as suas "tendências a afastar-se do Sol (ainda não se trata de uma força atrativa). No cálculo da 'tendência a afastar-se' da Lua, e da "tendência a afastar-se" na superfície da Terra, Newton não se refere explicitamente nem dá a entender que a gravidade possa se estender à órbita da Lua. A única aplicação que Newton faz de seu cálculo é a tentativa de explicar o fato de a Lua sempre apontar a mesma face para a Terra (COHEN, p. 262).

Assim, com base neste documento e em outros produzidos neste período, Cohen avalia que, entre os anos da segunda metade da década 1660 e início da década de 1670, Newton não efetuou a prova da Lua (COHEN, 1983, 1988). Esta prova consiste na demonstração de que a força de gravidade que atua na Terra tem na altura da órbita da Lua a mesma intensidade da força centrípeta que atua sobre ela. Isto levou Newton a postular que ambas as forças eram de mesma natureza, ou seja, que a força centrípeta é a força de gravidade e esta varia segundo a lei do inverso do quadrado da distância. Esta demonstração é feita por Newton, na proposição IV do livro III dos *Principia* (NEWTON, 2008, p. 197-198) e foi objeto de uma reconstrução didática empreendida por Freire Jr, Matos Filho e Vale (2004).

Além do manuscrito produzido em 1718, citado no início desta seção, existem vários relatos redigidos por pessoas próximas a Newton a partir de depoimentos dados por ele, em que muitas de suas descobertas no âmbito da mecânica celeste são antecipadas para os anos de sua juventude, notadamente 1665-1666; muito antes, portanto, do início de sua interação com Hooke, realizada em 1679-1680 (COHEN, 1983). Um desses relatos é a história da maçã, que apresenta várias versões independentes. Uma delas é a de John Conduitt, um colega de Newton dos tempos em que este trabalhara na casa da Moeda e que depois se casou com a sua sobrinha, que cuidava dele em seus últimos anos. Nesta versão, que não foi publicada por Conduit, o episódio é assim descrito:

No ano de 1666, ele tornou a se afastar de Cambridge [...], indo ter com a mãe em Lincolnshire, & quando meditava num jardim, ocorreu-lhe que o poder da gravidade (que derrubara uma maçã da árvore no chão) não estava limitado a uma certa distância da Terra, mas deveria estender-se muito além do que se costumava pensar. Por que não até a Lua?, disse ele a si mesmo, & se assim fosse, isso deveria influenciar o seu movimento & talvez mantê-la em sua órbita; ao que ele se pôs a calcular qual seria o efeito dessa suposição, mas estando afastado dos livros, & tomando a estimativa comumente utilizada pelos geógrafos & nossos navegadores antes de Norwood medir a Terra, de que havia 60 milhas inglesas contidas num grau de latitude na superfície da Terra, seu cálculo não

concordou com sua teoria & o inclinou a alimentar a idéia de que, junto com a força de gravidade, poderia haver uma mistura da força que a Lua teria se fosse arrastada por um vórtice (CONDUITT, apud WESTFALL, 1995, p. 50;51).

A história da maçã foi publicada pela primeira vez pelo filósofo francês Voltaire em 1727 (1694-1778). Por essa época, ele passou alguns anos na Inglaterra e tomou contato com o pensamento de Newton. Ao retornar à França tornou-se um grande divulgador das ideias newtonianas no continente europeu, contribuindo sobremaneira para que a física newtoniana passasse a ser aceita em seu país (MARTINS, 2006; NASCIMENTO, 1996). Em seu livro, “Elementos da Filosofia de Newton”, Voltaire procura tornar acessível ao público culto não especializado os conceitos centrais da física newtoniana. Aí o episódio da maçã é reconstruído a partir de um relato que ele teria ouvido de Catherine Barton, sobrinha de Newton.

Um dia, no ano de 1666, Newton retirado no campo, e vendo caírem frutos de uma árvore, segundo me contou sua sobrinha (Senhora Conduitt), entregou-se a uma profunda meditação sobre a causa que arrasta assim todos os corpos numa linha que, se fosse prolongada, passaria pelo centro da Terra. Qual é, ele se perguntava, esta força que não pode vir de todos estes turbilhões imaginários demonstrados como falsos? Ela age sobre todos os corpos na proporção de suas massas, e não de suas superfícies. Ela agiria sobre o fruto que vejo cair desta árvore, mesmo que a árvores tivesse três mil, dez mil toesas. Se isto for verdade, esta força deve agir desde o lugar onde está o globo da Lua até o centro da terra. Se for assim, este poder, qualquer que seja, pode pois ser o mesmo que faz os tenderem para o Sol, e faz os satélites gravitarem em torno de Júpiter (VOLTAIRE, 1996, p. 163).

Cohen avalia que “Newton deve ter inventado a história da maçã, que seria datada de meados da década de 60 do século XVII, na altura em que alegou ter feito o teste da Lua”. Mas também leva em conta que ao final de sua vida, e muitos anos após o episódio, “é provável que tenha começado a acreditar que tinha calculado a ‘queda da Lua’ em

1660 e tinha verificado que a demonstração era aproximadamente consistente com os fatos” (COHEN, 1988, p. 285).

Westfall também é bastante crítico em relação ao conteúdo presente nesta e em outras versões da história da maçã.

[...] Juntamente com o mito do *annus mirabilis* e com a anotação de Newton que dizia haver ele constatado que o cálculo tinha uma correspondência muito próxima, ela tem contribuído para a ideia de que a gravitação universal surgiu diante de Newton num lampejo de discernimento em 1666, [...] Formulado dessa maneira, esse relato não resiste a uma comparação com o histórico dos primeiros trabalhos de Newton na mecânica. Ele banaliza a gravitação universal, tratando-a com uma ideia brilhante. Uma ideia brilhante não consegue moldar uma tradição de pesquisa. Lagrange não chamou Newton de o homem mais afortunado da história por ele ter tido um lampejo de discernimento. A gravitação universal não se curvou diante dele ao primeiro esforço. Newton hesitou, tropeçou, momentaneamente aturdido por complexidades esmagadoras, que já eram imensas na simples mecânica e que foram várias vezes multiplicadas pelo contexto global (WESTFALL, 1995, p.51).

Tanto Cohen quanto Westfall salientam que, no manuscrito de 1667, Newton fala em tendência de afastamento. Além disso, o próprio relato de Conduitt revela que: “seu cálculo não concordou com sua teoria & o inclinou a alimentar a ideia de que, junto com a força de gravidade, poderia haver uma mistura da força que a Lua teria se fosse arrastada por um vórtice”. Este trecho fornece um claro indício das concepções teóricas do jovem Newton. Neste período Newton era um filósofo mecanicista fortemente ligado à ideia cartesiana de vórtices ou turbilhões de matéria. Eram os vórtices de matéria que na física cartesiana explicavam a gravidade e o movimento planetário (DESCARTES, 2007; COHEN, 1983; WESTFALL, 1995; MARTINS, 1998).

Deve-se observar também que, em relação ao movimento curvilíneo, Newton acreditava na existência de uma força ou tendência centrífuga distinta da ideia de uma força centrípeta (COHEN, 1983, p.263).

4.7.5 A troca de Cartas com Hooke: uma nova compreensão para a dinâmica do movimento curvilíneo e a descoberta de um novo significado para a lei das áreas

O interesse de Newton pela astronomia e pela dinâmica do movimento celeste ganharia um importante estímulo intelectual e começaria a tomar um novo rumo, entre novembro de 1679 e dezembro de 1680. Neste período Robert Hooke (1635-1703) e Newton trocariam uma série de cartas, em que Hooke expunha algumas de suas ideias sobre o movimento planetário e a lei de força que poderia ser associada a este movimento. Este curto período de correspondência entre os dois será de grande importância para a evolução do pensamento newtoniano. É a partir desta interação que se deflagra no espírito de Newton um radical processo de revisão de suas concepções sobre a dinâmica do movimento celeste (DIAS; SANTOS; SOUZA 2004; COHEN, 1983; WESTFALL, 1995).

Em 24 de novembro de 1679, logo após ser nomeado secretário da Royal Society, Hooke envia uma carta a Newton na qual, após convidar-lhe a retomar o intercâmbio científico com a Sociedade, lhe pede comentários acerca de uma hipótese e uma opinião sua “consistente em compor os movimentos celestes dos planetas [a base] de um movimento direto pela tangente & um movimento atrativo para um corpo central” (Hooke, *apud*, COHEN, 1983, p. 265).

Em linguagem atual o que Hooke propunha era a interpretação do movimento orbital como resultante da composição de dois movimentos: um inercial ao longo da tangente à curva e o outro sob a ação de uma força voltada para o seu centro. Esta interpretação era, então, muito original; pela primeira vez o movimento orbital tinha os seus elementos dinâmicos definidos corretamente (PEDUZZI, 2008; COHEN, 1983, p.264; WESTFALL, 1995, p. 147).

Em sua resposta (28 de novembro de 1679), Newton não discutiu a hipótese de Hooke, em vez disso, apresentou uma discussão sobre os efeitos da rotação diurna da Terra sobre a trajetória de um corpo em queda livre. Propôs que o corpo cairia segundo uma espiral que, hipoteticamente, se estenderia até o centro da Terra (Fig. 5). Newton escreveu ainda que desconhecia a ‘hipótese’ de Hooke sobre a composição dos movimentos orbitais (COHEN, 1983, p. 265; WESTFALL, 1995, p. 149).

Em 13 de dezembro de 1679, Newton escreveu a Hooke reconhecendo que o corpo não cairia no centro, mas que giraria em torno deste em um alternado movimento de ascensão e queda. Este problema é especialmente importante, pois:

[...] achar a trajetória de um corpo em queda livre sobre uma Terra em movimento é matemática e fisicamente equivalente a achar uma órbita planetária, dado que o corpo que cai começará o seu movimento como se tivesse recebido um impulso ou tivesse uma componente de movimento inercial (tangencial), sendo logo e continuamente atraído para o centro (neste caso, o da Terra) (COHEN, 1983, p. 265).

Com a sua “teoria dos movimentos circulares, compostos de um movimento direto e um movimento de atração para um centro”, Hooke tratou o problema da queda livre em uma Terra móvel como o problema do movimento orbital, uma abordagem inusitada na época e que causou uma forte impressão em Newton (WESTFALL, 1995, p. 150).

Em 6 de janeiro de 1679/1680³, Hooke escreveu a Newton acerca de uma hipótese sua, relativa à força de atração que mantém os planetas em órbita:

[...] a atração se acha sempre em uma proporção duplicada com a distância do centro reciprocamente, e, por conseguinte a velocidade se achará um uma proporção sub-duplicada com a atração e, portanto, como supõe Kepler, reciprocamente com a distância (HOOKE, apud, COHEN, 1983, p. 265).

Newton se absteve de comentar esta hipótese de Hooke, mas não se eximiu de explorar as suas consequências; demonstrou para si mesmo que, a velocidade de um corpo que se movimenta em órbita elíptica sob a ação de uma força inversamente proporcional ao quadrado da distância não era inversamente proporcional à distância do corpo ao centro de força, como supunha Kepler, e sim inversamente proporcional à distância perpendicular do centro de força à reta tangente à órbita. Anos depois esta demonstração apareceria, nas três primeiras edições dos

³ 1679 pelo calendário inglês da época e 1680 pelo calendário Gregoriano, vigente no continente europeu.

Principia, mas precisamente na Proposição XVI do livro I (COHEN, p.267; NEWTON, 2002, p.108).

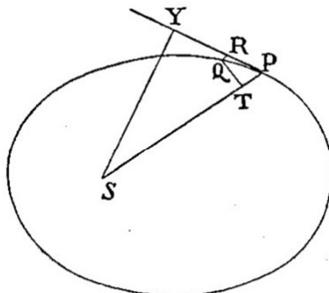


Figura 7 - Esquema de Newton demonstrando que a velocidade do planeta não varia com o inverso de sua distância ao Sol.

Fonte: Newton (2002, p.108).

Em uma nova carta (15 de janeiro de 1679/1680), Hooke reiterava a sua suposição concernente à existência de uma força atrativa, e argumentava que Newton conseguiria obter a forma da curva e sugerir uma razão física para a sua proporção:

Resta agora averiguar as propriedades de uma linha curva (nem circular nem concêntrica) realizada por uma potência atraente central que faça que as velocidades de descida desde a linha tangente ou igual movimento retilíneo, a todas as distâncias, estejam em uma proporção duplicada das distancias recíprocas tomadas [i.e., inversamente como o quadrado das distâncias]. Não me cabe a menor dúvida de que com vosso excelente método podeis achar facilmente qual há de ser tal curva, assim como suas propriedades, sugerindo ademais uma razão física desta proporção (Newton apud COHEN, 1983, p. 266).

Mais uma vez Newton se esquivava de debater esses problemas com Hooke, mas se dedica a explorar matematicamente as suas hipóteses. Após sucessivas evasivas a correspondência com Hooke se encerra em fins de 1680.

A análise de Hooke do movimento curvilíneo foi a senha que Newton precisava para avançar rapidamente em seus estudos sobre o movimento celeste. Curiosamente, conforme abordado nas seções anteriores, ele já havia feito algumas incursões bem interessantes na análise do movimento planetário. Mesmo trabalhando com a ideia equivocada de “tendência a afastar-se do centro”, ou força centrífuga, havia obtido resultados que, agora, reexaminados à luz da ideia de uma atração para um corpo central e da decomposição do movimento curvilíneos, ganhariam uma interpretação que se constituiria em um primeiro passo em direção ao um conceito de gravitação universal. Ao contrário de Hooke, Newton era um notável matemático e segundo o próprio Hooke, conseguiria chegar “facilmente” a uma causa física para o movimento celeste. Bem, sabe-se que o caminho não foi tão fácil assim. Antes de chegar a uma causa física para o movimento planetário, fazia-se necessário resolver intrincados problemas matemáticos inerentes à articulação da sugestão de Hooke às leis de Kepler.

A correspondência com Hooke em 1679/1680 foi extremamente profícua para a evolução das ideias newtonianas sobre o movimento celeste. Cohen (1983, p. 270) assinala que em vários documentos não publicados Newton admitia que a correspondência com Hooke lhe proporcionou uma boa oportunidade para o estudo da dinâmica do movimento planetário, embora não admitisse que Hooke tivesse fornecido qualquer contribuição significativa ao seu pensamento.

A partir da interação com Hooke emergem das investigações de Newton três contribuições que seriam fundamentais para a formulação da lei da gravitação universal: a transformação da força centrífuga em força centrípeta, a descoberta do caráter dinâmico da lei das áreas e a ideia de uma força atrativa. Esses três avanços têm como ponto de partida a sugestão de Hooke de imaginar o movimento planetário como resultante de um movimento tangencial de caráter inercial e um movimento acelerado voltado para o centro, ou seja, sob a ação de uma força central (COHEN, 1983, p.272-275).

Assim, norteado por essa sugestão de Hooke e fazendo uso de seu notável instrumental matemático, Newton retoma os seus estudos sobre a dinâmica do movimento planetário. Nesta nova incursão abandona o enfoque, até então corrente entre os seus contemporâneos, de associar a um corpo em movimento curvilíneo a ideia cartesiana de “tendência a afastar-se do centro”, ou força centrífuga, como a designara Huygens. Dessa forma, a expressão da antiga “força centrífuga” - $f \propto v^2/r$ - é articulada por Newton a um novo conceito - a força centrípeta.

O segundo passo relacionado a esta mudança de enfoque no tratamento do movimento curvilíneo foi a descoberta do caráter dinâmico das leis das áreas. Convém salientar que à época de Newton muitos manuais e tratados astronômicos apresentavam a astronomia kepleriana sem a lei das áreas, utilizando em seu lugar um ou outro artifício geométrico. Ademais, antes da correspondência com Hooke a lei das áreas não estava entre os princípios astronômicos de Newton e não desempenhou em suas incursões na astronomia nenhum papel ativo, ao contrário do que ocorreu com a lei harmônica, que o auxiliou na obtenção da lei do inverso do quadrado para órbitas circulares (COHEN, 1983, p. 273).

Segundo Cohen (1983), a maioria dos estudiosos admite que a sequência das descobertas de Newton em relação à aplicação do método de Hooke ao estudo das leis de Kepler segue mais ou a menos a sequência apresentada por ele nos *Principia* e em um pequeno tratado escrito um pouco antes - o *De motu*.

Assim, ao que parece, a atribuição de um caráter dinâmico à lei das áreas, foi o primeiro sucesso à luz do novo enfoque sugerido por Hooke. Na proposição I, do livro I dos *Principia*, Newton escreve:

As áreas que os corpos que giram descrevem por meio de raios traçados até um centro de força imóvel situam-se nos mesmos planos imóveis, e são proporcionais aos tempos nos quais são descritas (NEWTON, 2002, p. 83).

A demonstração que se segue a esta proposição é feita em três passos. No primeiro (Fig. 8) Newton mostra que, para um corpo em movimento inercial ligando-se as suas sucessivas posições, em intervalos de tempos iguais, a um ponto externo à sua trajetória, o segmento de reta que conecta o corpo ao ponto externo varre áreas iguais em intervalos de tempos iguais (COHEN, 1983, p. 196). Com essa demonstração simples, ele estabeleceu pela primeira vez a íntima conexão entre a lei da inércia e a lei das áreas.

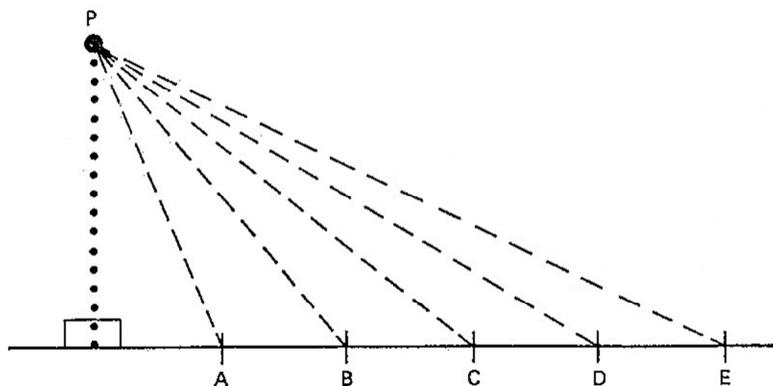


Figura 8 - Um corpo em movimento inercial satisfaz a lei das áreas em relação a um ponto P externo à sua trajetória.

Fonte: Cohen (1983, p.196).

No passo seguinte, Newton supõe que em intervalos de tempos regulares o corpo sofre a ação de uma força impulsiva, sempre direcionada para o ponto S. Em decorrência desses sucessivos impactos a trajetória retilínea se converte em uma linha poligonal, onde entre cada golpe da força tem-se um movimento inercial. Novamente se verifica que os triângulos formados pelos sucessivos segmentos que compõe a poligonal e os segmentos que ligam o corpo ao ponto S possuem áreas iguais, o que equivale a dizer que o segmento que conecta o ponto S às sucessivas posições no qual o corpo é desviado pela força f descreve áreas iguais em intervalos de tempos iguais (NEWTON, 2002, p. 84).

No terceiro passo, Newton lança mão de sua ideia de limite ao argumentar que, à medida que o intervalo tempo entre os sucessivos golpes torna-se indefinidamente pequeno, ou à medida que o número de triângulos torna-se indefinidamente grande, a linha poligonal tende a uma curva.

Portanto, a força centrípeta, pela qual o corpo é continuamente retirado da tangente dessa curva, atuará continuamente; e quaisquer áreas descritas SADS, SAFS, que são sempre proporcionais aos tempos em que são descritas, serão, também neste caso, proporcionais àqueles tempos. Q.E.D (NEWTON, 2002, p. 84).

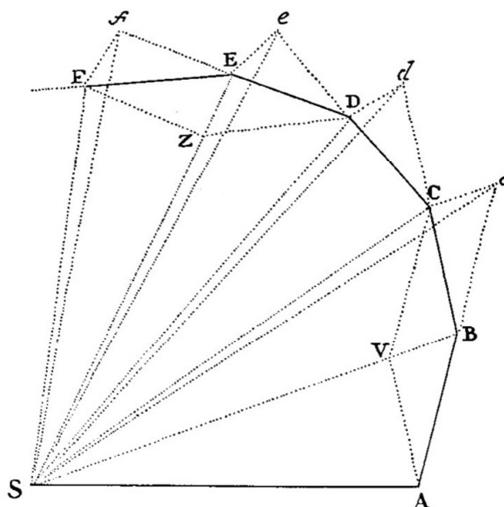


Figura 9 - Esquema demonstrativo de que um corpo sujeito a uma força centrípeta instantânea atuando em intervalos de tempos regulares satisfaz à lei das áreas em um ponto.

Fonte: Newton (2002, p. 86).

Assim, Newton demonstrou que se um corpo em movimento inercial passa a sofrer a ação contínua de uma força centrípeta o movimento inercial se transformará no movimento ao longo de uma curva e obedecerá à lei das áreas.

Na proposição II dos *Principia* Newton demonstrou que se um corpo em movimento curvilíneo obedece à lei das áreas isto implica em um movimento com um componente inercial alterada continuamente pela ação de uma força central.

Dessa forma, com as proposições I e II, Newton estabelece a lei das áreas como condição necessária e suficiente para a existência de uma força centrípeta.

A partir proposição XI, Newton investiga o movimento de um corpo em trajetória elíptica com o intuito de encontrar a lei de força associada a uma força centrípeta voltada para um dos focos da elipse. Demonstra então que a força centrípeta varia inversamente com o quadrado da distância do corpo ao foco. Este resultado, sem dúvida alguma, foi de grande importância para a ruptura epistemológica

representada pela assunção do conceito de gravitação universal (NEWTON, 2002, p. 101-102).

Nas proposições XII e XIII, Newton demonstra que para órbitas parabólicas ou hiperbólicas, a força centrípeta também varia na razão inversa do quadrado da distância a um dos focos (NEWTON, 2002, p. 103-105).

Na proposição XVII, Newton demonstra que se um corpo se movimenta sob a ação de uma força central inversamente proporcional ao quadrado da distância, então a sua trajetória será uma cônica: uma elipse, uma parábola ou uma hipérbole (NEWTON, 2002, p. 110-112).

Assim, instrumentalizado pela lei das áreas e com uma original medida matemática da força centrípeta, desenvolvida agora para trajetórias não circulares (Proposição VI). Newton logrou demonstrar que o movimento planetário em órbitas elípticas (e também o movimento dos cometas em órbitas elípticas ou parabólicas) é uma combinação do movimento inercial e um tipo particular de força centrípeta que varia inversamente com o quadrado da distância. Todos esses resultados foram obtidos, basicamente, durante ou logo após o período de interação como Hooke (COHEN, 1983, p. 264-281; COHEN, 1988, p. 273-277).

O terceiro fator apontado por Cohen (1983, p.275) como fundamental para o desenvolvimento da gravitação universal foi a ideia de uma força atrativa: “o desejo de Newton de considerar a ação de forças atrativas que podem produzir órbitas elípticas a milhões de milhas de distância”.

Em relação às forças atrativas, Richard Westfall assinala que nos anos de 1679-1680, Newton empreendeu uma profunda reorientação de sua filosofia da natureza, indo além da filosofia mecânica então prevalecente. Esta filosofia procurava explicar todos os fenômenos em termos de partículas materiais em movimento. E ao que parece, a nova filosofia de Newton sugeria acrescentar as forças de atração e repulsão à ontologia tradicional da filosofia mecânica (ABRANTES, 1998, p.83; WESTFALL, 1995, p. 153).

Para Cohen (1983, p. 276) não há dúvidas de que “Newton chegou a considerar as forças centrípetas como se fossem entidades por direito próprio”, fixando a sua atenção na ação dessas forças para produzir aceleração. Isto exigia o abandono do conceito de “*conatus*”, ou “tendência” de um corpo e sua substituição pelo conceito de força externa, passando a admitir a possibilidade dos corpos exercerem forças sobre outros corpos a grandes distâncias.

Certamente foi um novo modo de abordar o problema das forças o que conferiu a Newton o poder de moldar a reconstrução da dinâmica e da formulação do sistema do mundo baseado na dinâmica celeste, permitindo também desenvolver o conceito de gravitação universal e examinar suas consequências, descobrindo a lei gravitacional (COHEN, 1983, p.276).

Todavia, segundo a interpretação de Cohen, “a chave do pensamento criador de Newton em mecânica celeste”, não consistiu em considerar as forças como propriedades reais dos corpos ou da matéria macroscópica, mas na capacidade de examinar as condições e propriedades de tais forças como se fossem reais. A forma engenhosa como Newton articula a sua sofisticada matemática à análise dos problemas da física do movimento é denominada por Cohen como estilo newtoniano. Este estilo permitiu a Newton abster-se, ao menos temporariamente, dos problemas inerentes ao conflito entre o conceito de força centrípeta ou atrativa e a filosofia mecânica tradicional.

Uma análise profunda da relação entre a física de Newton e sua filosofia da natureza demandaria um apurado estudo da evolução do conceito de força na física de Newton. Todavia, para o objetivo imediato de estudar a articulação entre as leis de Kepler e o desenvolvimento da mecânica celeste de Newton, desde o período de interação com Hooke, até o término dos *Principia* (de 1679-1680 a 1686), tal análise pode ser dispensada, devendo-se observar que Newton utiliza forças externas que modificam o estado de repouso ou movimento de um corpo, e também “força” internas que não produzem tais alterações, mas simplesmente traduzem uma espécie de resistência dos corpos a qualquer mudança de estado. Este ponto de vista é defendido por Cohen (1983) e norteia o espírito da reflexão aqui desenvolvida.

4.7.6 Da força centrípeta à gravitação universal

Na seção anterior argumentou-se que a partir da correspondência com Hooke as incursões de Newton na dinâmica do movimento planetário conduziram-no a três descobertas, ou formulações fundamentais para a emergência do conceito de gravitação universal: a transformação da força centrífuga em força centrípeta, a descoberta do caráter dinâmico da lei das áreas e a ideia de uma força atrativa. Essas três novas formulações estão intimamente articuladas e, sem dúvida

alguma, foram de grande importância para a construção de uma nova mecânica celeste. Todavia, a ideia de uma força atrativa, para se ajustar a complexidade do mundo físico real precisaria de novas transformações. A força centrípeta que emerge da interação com Hooke ainda não é a força de gravitação universal.

Além do intercâmbio epistolar com Robert Hooke, o caminho de Newton para a gravitação universal tem outro evento marcante. Em agosto de 1684, o astrônomo Edmond Halley (1656 - 1742) decidiu ir a Cambridge consultar Isaac Newton acerca da seguinte questão: que trajetória seria seguida pelos planetas se eles fossem continuamente atraídos para o Sol por uma força inversamente proporcional ao quadrado da distância do planeta ao Sol. Em essência tratava-se da mesma questão apresentada por Hooke a Newton no inverno de 1679-1680 – “a derivação das leis do movimento planetário de Kepler a partir de princípios de dinâmica” (WESTFALL, 1995, p. 158).

Em uma reunião da Royal Society, em janeiro de 1684, Halley, Hooke e Christopher Wren (1632-1723) haviam discutido sobre a lei de força que poderia estar associada ao movimento planetário. Hooke e Halley, trabalhando de forma independente, usaram a regra da força centrífuga de Huygens e a terceira lei Kepler para concluir que a força centrífuga (centrípeta, segundo a interpretação de Hooke) que atua sobre um planeta varia com o inverso do quadrado da distância do Planeta ao Sol, supondo-se que as órbitas são circulares. Ao que parece, Wren também havia chegado à lei do inverso do quadrado. Contudo nenhum desses três cientistas logrou demonstrar que uma força inversamente proporcional ao quadrado da distância determina órbitas elípticas e vice-versa (COHEN, 1988, p. 188).

Um relato quase contemporâneo da visita de Halley foi feito por Abraham DeMoivre, a partir de um depoimento de Newton:

Em 1684, o dr. Halley foi visitá-lo em Cambridge e, depois de passarem algum tempo juntos, o dr. perguntou-lhe como ele pensava que seria a curva descrita pelos planetas, supondo-se que a força de atração do Sol fosse inversa ao quadrado de suas distâncias a ele. Sir Isaac retrucou imediatamente que seria uma elipse, ao que o dr., com grande alegria & assombro, perguntou-lhe como sabia disso; ora, disse ele, eu a calculei; ao que o dr. Halley pediu-lhe seu cálculo sem maiores delongas, Sir Isaac procurou entre seus papéis e não conseguiu encontrá-lo, mas prometeu refazê-

lo & depois lho enviar. [...] (DeMoivre, apud, WESTFALL, 1995, p. 159).

Após a visita de Halley, Newton não apenas refez a demonstração como reexaminou os seus trabalhos, colocando-os em ordem. Em novembro de 1684, enviou a Halley um pequeno tratado intitulado *De motu corporum in gyrum* (Do movimento dos corpos em órbita). No *De motu* Newton expôs as suas recentes descobertas feitas mediante a articulação do método de Hooke e das leis de Kepler ao estudo do movimento planetário. Em especial, Newton demonstrou que se um corpo em movimento elíptico satisfaz a lei das áreas, isto implica que ele está sujeito a ação de uma força centrípeta inversamente proporcional ao quadrado da distância do corpo ao ponto em relação ao qual as áreas são calculadas (COHEN, 1988, p. 293).

Ao examinar o *De motu*, Halley logo percebeu que ele incorporava um importante avanço na mecânica celeste. Em função disso, ele procurou incentivar Newton a expor as suas descobertas uma obra de maior amplitude. Com o incentivo de Halley, Newton passou a se dedicar com mais afinco ao estudo da mecânica e da dinâmica do movimento planetário, passando a examinar e desenvolver com maior rigor e profundidade as suas ideias (WESTFALL, 1995, p. 160).

O *De motu* incorpora alguns importantes avanços no campo da mecânica celeste, o que logo foi reconhecido por Halley. Nele Newton introduz no vocabulário da mecânica o termo força centrípeta: “Chamo de força centrípeta àquilo que faz com que um corpo seja impelido ou atraído por um ponto considerado como centro” (WESTFALL, 1995, p. 164). Além disso, Newton faz uso de suas duas primeiras leis do movimento. A primeira lei aparece de forma explícita (ainda que sob um enunciado obscuro para o leitor moderno), enquanto que a segunda lei pode ser evidenciada na demonstração da relação da lei das áreas com uma força central. Contudo, este pequeno tratado apresenta uma grande lacuna conceitual, quando se pensa em um sistema de mundo regido por uma força de gravitação universal - a ausência da terceira lei do movimento.

Em dezembro de 1684, Newton conclui uma revisão do *De motu* na qual já sinaliza a necessidade de compreensão da dinâmica do movimento planetário em termos de um sistema interativo de muitos corpos. Neste novo contexto interpretativo Newton percebe que os planetas não se movimentam exatamente em órbitas elípticas nem descrevem duas vezes a mesma órbita. A interação mútua entre os

corpos celestes torna o sistema planetário extremamente complexo, o que leva Newton a declarar:

Há tantas órbitas para um planeta quantas as suas revoluções, tal como no movimento da Lua, e a órbita de qualquer planeta depende do movimento combinado de todos os planetas, para não mencionar a acção de todos estes uns sobre os outros. [...] Considerar simultaneamente todas estas causas do movimento e definir estes movimentos por leis exactas convenientes ao cálculo excede, a menos que eu esteja enganado, a capacidade de todo o intelecto humano (NEWTON, apud COHEN, 1988, p.295- 296).

Como consequência das interações gravitacionais mútuas tem-se que, no mundo físico as três leis de Kepler do movimento planetário não são estritamente verdadeiras. Essas leis são válidas tão somente em uma construção matemática idealizada na qual os pontos de massa, que não interagem entre si, descrevem órbitas em torno de um centro matemático de força, ou de um corpo atrativo central fixo (COHEN, 1983, p. 289).

A distinção que Newton traça entre o reino da matemática, na qual as leis de Kepler são verdadeiras, e o reino da física, no qual elas são apenas ‘hipóteses’ ou aproximações, é um dos aspectos revolucionários da dinâmica celeste newtoniana (COHEN, 1988, p.296).

Assim, no processo de revisão do *De motu*, Newton começa a amadurecer a ideia de uma ação mútua entre os corpos celestes. Segundo Cohen, não há documentos que revelem como e por que Newton chegou à compreensão de que os planetas deveriam atuar gravitacionalmente entre si. Todavia, na passagem de revisão do *De motu* citada mais acima a referência às interações mútuas entre os planetas, “as ações de todos eles uns sobre os outros”, fornece uma evidência inequívoca desta compreensão da dinâmica do movimento planetário (COHEN, 1988, p. 296).

A percepção e o enfrentamento do problema das atrações mútuas entre os corpos celestes conduziu Newton a articular à dinâmica do movimento planetário a sua terceira lei do movimento, segundo a qual a toda ação corresponde uma reação igual e contrária. Dessa forma, na

primavera de 1685, alguns meses após a revisão do *De motu* Newton conclui um primeiro rascunho dos *Principia*. Neste tratado, Newton desenvolve as suas ideias sobre a lei de ação e reação, e utiliza esta lei no estudo dos movimentos celestes.

Na seção XI do livro I dos *Principia*, Newton desenvolve uma nova dinâmica para os corpos que se movimentam sob a ação de forças centrípetas. Neste novo enfoque articula a terceira lei do movimento, ao considerar o problema das interações mútuas. Logo na introdução ele assinala a limitação dos enfoques que não levam em conta essas interações:

Até agora tenho tratado das atrações de corpos na direção de um centro imóvel, embora seja muito provável que tal coisa não exista na natureza. Porque, pela Lei III, atrações são exercidas na direção dos corpos, e as ações dos corpos atraídos são sempre recíprocas e iguais, de forma que se há dois corpos, nem o corpo atraído nem o atrativo estão realmente em repouso, mas ambos (pelo Corolário IV das Leis do Movimento), considerando-se que sejam mutuamente atraídos, giram em torno de um centro comum de gravidade (NEWTON, 2002, p. 224).

No âmbito do movimento planetário, a importância da terceira lei do movimento, na análise das ações das forças centrípetas sobre os corpos atraídos, pode ser evidenciada nesta passagem de *O Sistema do Mundo*:

Uma vez que a ação da força centrípeta sobre os corpos atraídos é, a distâncias iguais, proporcional às quantidades de matéria nesses corpos, a razão requer que ela também seja proporcional à quantidade de matéria no corpo atraente. Pois toda ação é mútua e (pela terceira Lei do Movimento) faz com que os corpos aproximem-se um do outro e, portanto, deve ser a mesma em ambos os corpos. É verdade que podemos considerar um corpo como atraente e outro como atraído, mas esta distinção é mais matemática do que natural. A atração reside, de fato, em cada corpo na direção do outro, sendo, portanto, do mesmo tipo em ambos (NEWTON, 2008, p. 354).

Na passagem seguinte, a ideia das interações gravitacionais planetárias e o papel central da terceira lei do movimento aparecem de forma contundente.

Daí que a força atrativa é encontrada em ambos. O sol atrai Júpiter e os outros planetas; Júpiter atrai seus satélites e, pela mesma razão, os satélites atuam um sobre o outro como sobre Júpiter, e todos os planetas agem mutuamente entre si. E ainda que as ações mútuas de dois planetas possam ser distinguidas e consideradas como duas, pelas quais cada planeta atrai o outro, mesmo assim, como essas ações estão entre ambos, elas não perfazem duas, mas uma operação entre dois termos. [...] Não é por uma ação que o sol atrai Júpiter e por outra que Júpiter atrai o sol, mas é por uma única ação que o sol e Júpiter mutuamente buscam aproximar-se (NEWTON, 2008, p.354).

Essas duas passagens são citadas por Cohen (1983, p.291, 292; 1988 p.296-298), que esclarece que elas aparecem na primeira versão dos *Principia*, mais especificamente, em um segundo livro sobre o sistema do mundo, que acabou sendo suprimido por Newton e substituído pelo livro III, no qual o mesmo tema é tratado em uma linguagem matemática mais rigorosa. Segundo Cohen, é razoável supor que se trate do mesmo caminho que, alguns meses antes, conduziu Newton à ideia das atrações mútuas, apresentada na revisão do *De motu* (COHEN, 1983, p.291; 1988, p.296).

Ainda no *Sistema do Mundo*, na continuidade de sua exposição Newton argumenta que todos os corpos se atraem mutuamente, salientando que estas atrações são desprezíveis entre os corpos de muito pequenos. É apenas nos grandes corpos celestes, como o Sol os planetas e seus satélites, que essas forças tornam-se perceptíveis (NEWTON, 2008, p. 355-356).

No livro III dos *Principia*, Newton analisa os fenômenos abordados em *O Sistema do Mundo* a partir de um sofisticado ferramental matemático. É especialmente, instrutivo observar nas proposições de I a III como Newton explica o movimento orbital dos planetas e satélites usando tão somente o conceito de força centrípeta e a

variação dessa força com o inverso do quadrado da distância ao centro de atração.

É a partir da proposição IV do livro III que a força centrípeta do *De motu*, uma interessante inovação resultante da correspondência com Hooke, começa a se revelar de forma explícita para a comunidade científica como uma força de gravitação de caráter universal. Nesta proposição, Newton, através de uma experiência de pensamento (“o teste da Lua”), estende a gravidade terrestre até a órbita da Lua. Esta “experiência” o leva a concluir que a aceleração de queda da Lua em direção à Terra, tem o mesmo valor que a aceleração de um objeto terrestre colocado na órbita da Lua. Assim, Newton postula que a força centrípeta sobre a Lua é a força de gravidade terrestre.

Na proposição V, Newton postula que os planetas se movimentam em torno do sol devido a uma gravidade solar, e que da mesma forma os satélites se movimentam em torno dos planetas devido a uma gravidade que aponta para estes planetas. A questão das interações gravitacionais mútuas e o papel da terceira lei do movimento podem ser evidenciados na proposição V – corolários I e III. E no Escólio a esta proposição, Newton assume sem reservas o papel da força gravitacional na dinâmica dos corpos celestes:

A força que mantém os corpos celestes em suas órbitas tem sido chamada até aqui de força centrípeta, mas tendo ficado evidente que ela não pode ser outra que não uma força gravitacional, vamos chamá-la daqui por diante de gravidade. Pois a causa desta força centrípeta que mantém a lua em sua órbita estende-se a todos os planetas [...] (NEWTON, 2008, p. 200).

E finalmente, coroando todo o processo de sucessivas transformações da ideia de força centrípeta atrativa, emergiu um princípio de gravitação universal, segundo o qual, quaisquer dois corpos, em qualquer parte do universo, agem gravitacionalmente um sobre o outro. Esta força varia na razão inversa do quadrado da distância entre esses corpos e é proporcional às suas massas gravitacionais.

5 AS LIMITAÇÕES DA GRAVITAÇÃO NEWTONIANA E A GÊNESE DA GRAVITAÇÃO EINSTEINIANA

5.1 INTRODUÇÃO

Na primeira década do século XX alguns pressupostos básicos da mecânica como, o princípio da relatividade e os conceitos de espaço e tempo absolutos, passariam por profundo reexame que resultariam na emergência da teoria da relatividade especial. Esta teoria resolveu um importante conflito conceitual e epistemológico que havia entre a interpretação conferida ao eletromagnetismo no início do século XX e a bem consolidada mecânica newtoniana.

A relatividade especial, ao postular um valor limite para a velocidade da luz entrou em conflito com a gravitação newtoniana. Da percepção deste conflito e dos sucessivos esforços para o seu enfrentamento emergiria em fins de 1915 a um novo conceito de gravitação com a formulação da teoria da relatividade geral.

Este capítulo empreende uma reflexão histórica que aborda, em linhas gerais, os desenvolvimentos teóricos e experimentais que, ao conflitarem com a mecânica e depois com a gravitação newtoniana, nortearam os esforços de construção de um novo entendimento da gravitação. A sua composição levou em conta o fato de que, que em muitos cursos de graduação, principalmente nos de Licenciatura, a gravitação einsteiniana não é discutida em uma perspectiva histórica.

Dessa forma, ao se levar os frutos dessa reflexão aos estudantes de física, almeja-se proporcionar um quadro mais amplo sobre as transformações sofridas pelo conceito de gravidade, complementando assim, ainda que de forma limitada, a reconstrução histórica empreendida no capítulo 4.

5.2 A RETOMADA DA CONCEPÇÃO ONDULATÓRIA DA LUZ E O DESENVOLVIMENTO DO ELETROMAGNETISMO

No início do século XIX, os trabalhos de Thomas Young e depois de Augustin Fresnel trazem de volta ao cenário científico a concepção da luz como um fenômeno ondulatório, após um século de hegemonia da teoria corpuscular.

A ideia da luz como um fenômeno ondulatório que se propaga em um meio foi defendida no século XVII por René Descartes. Em sua concepção, o espaço é preenchido por uma matéria sutil – o éter – e a luz é uma perturbação que se propaga através desse meio. Na segunda

metade deste século a natureza da luz foi intensamente debatida por alguns dos mais eminentes filósofos naturais. Entre os defensores da concepção ondulatória estavam nomes de peso como Huygens e Robert Hooke. Já a concepção corpuscular tinha em Isaac Newton o seu principal defensor.

As teorias ondulatórias de Huygens e corpuscular de Newton explicavam quase os mesmos fenômenos. Contudo, em função de uma certa coerência da teoria corpuscular, das dificuldades técnicas associadas às medidas dos efeitos de interferência e difração da luz, e do prestígio de Newton, a maioria dos físicos do século XVIII, optou pela teoria corpuscular (BEN-DOV, 1996 p.90)

No entanto, no início do século XIX, principalmente após alguns desenvolvimentos técnicos que permitiram medir com precisão a difração e interferência da luz, a concepção ondulatória foi retomada. Este retorno da concepção ondulatória trouxe consigo a exigência de um meio no qual as ondas luminosas pudessem se propagar. Ressurge assim a ideia de um éter luminífero (SILVEIRA; PEDUZZI, 2006).

Paralelamente aos novos desenvolvimentos teóricos e experimentais da Óptica, verifica-se também na primeira metade do século XIX, um grande esforço no sentido de unificar, em um mesmo quadro teórico, os fenômenos elétricos e magnéticos que até então haviam sido estudados de forma isolada e numa perspectiva predominantemente mecanicista (GUERRA; REIS; BRAGA, 2004).

Durante o século XVIII, a observação de alguns fenômenos naturais como os desvios de uma bússola e a imantação de materiais de ferro durante as tempestades, sugeriam aos cientistas a existência de uma conexão entre a eletricidade e magnetismos. Todavia, os experimentos em laboratório envolvendo a produção de descargas elétricas e a imantação de pequenas agulhas de ferro não levaram a comunidade científica a resultados conclusivos sobre a conexão entre os fenômenos elétricos e magnéticos (ROCHA, 2002, p.247).

A invenção da pilha elétrica, por Alessandro Volta, em 1799 possibilitou a abertura de novos rumos para as pesquisas elétricas. Com a produção de um fluxo contínuo de eletricidade, novos fenômenos passam a ser estudados, e a busca de conexões entre fenômenos, até então considerados desconexos, ganha um novo impulso (PEDUZZI, 2008c, p.107).

Nesse contexto, o físico Hans Christian Oersted (1777-1851) realizou, em 1820, uma série de experiências nas quais conseguiu demonstrar que a passagem de uma corrente elétrica por um fio condutor, desviava uma agulha imantada colocada em sua proximidade.

Uma característica marcante desse experimento era a inadequação do modelo de força newtoniana para explicar o comportamento da agulha:

[...] ao contrário do que o modelo de força newtoniana sugeria, a agulha se orientava não paralelamente, mas perpendicularmente ao fio condutor. Além disso, quando era colocada acima do fio, a agulha tomava uma direção inversa àquela observada quando estava sob o fio (BONDOV, 1996, p.99).

Na interpretação que Oersted, a linha de ação da força magnética é um círculo e a interação não se dá à distância, mas através de um agente intermediário:

Para explicar como uma agulha magnética se posicionava perto do fio condutor ele supôs que a corrente elétrica produzia turbilhões que giravam em torno do fio, pois não era possível explicar o efeito através da ideia de atrações e repulsões (MARTINS, 2005, p. 12).

Oersted publicou os resultados de suas pesquisas em julho de 1820 em um artigo intitulado “Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética”, provocando um grande interesse nas pesquisas sobre o vínculo entre a eletricidade e magnetismo (ROCHA, 2002, p.250).

Ampère foi um dos cientistas impactados pela experiência de Oersted. Ele desenvolveu uma série de experimentos em que demonstra que uma corrente elétrica não apenas cria um magnetismo capaz de desviar a agulha de uma bússola, mas que a própria corrente é também influenciada pelo magnetismo. Por exemplo, dois fios retilíneos condutores percorridos por correntes elétricas exercem, um sobre o outro, forças atrativas ou repulsivas devido ao magnetismo criado por cada corrente. Contudo Ampère, não se afastou da ideia de ação à distância:

Ampère mostrou que as forças entre correntes elétricas podiam ser analisadas como simples atrações e repulsões e, supondo que um ímã é equivalente a um solenoide, explicou todos os

fenômenos eletromagnéticos que eram conhecidos utilizando a ideia de forças a distância (MARTINS, 2006, p.2005).

Além de Ampère, outros pesquisadores conseguem produzir novas evidências experimentais do estreito vínculo entre o magnetismo e a eletricidade. Dominique François Jean Arago (1786-1853) e Joseph Louis Gay-Lussac (1788-1850) verificam a magnetização de agulhas de ferro e de aço por correntes elétricas; Jean-Baptiste Biot (1774-1862) e Felix Savart (1791-1841) medem a força magnética produzida por uma corrente elétrica sobre o polo de uma agulha imantada.

As experiências de Biot e Savart clarificam ainda mais certas características da força magnética que não se ajustam às ideias newtonianas de força. A interação magnética entre um condutor e um ímã colocado paralelamente a ele não é central, mas perpendicular ao plano definido por ambos. Outra singularidade da interação magnética era que esta não parecia processar-se à distância, o que, para alguns, sugeria a existência de um meio mediador (PEDUZZI, 2008 c, p.108).

Assim, o modelo mecânico de uma força central atuando à distância, como a força gravitacional, que havia norteado fortemente as pesquisas elétricas e magnéticas no século XVIII, começava a dar sinais de esgotamento. Os fenômenos eletromagnéticos suscitavam a emergência de uma nova abordagem para o conceito de força.

Um marco decisivo para a construção de uma nova abordagem dos fenômenos eletromagnéticos situa-se na obra de Michael Faraday (1791-1867). Assim como outros de seus contemporâneos Faraday também é impactado pela experiência que ilustra o “efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética”. E, a partir de 1821, passa a dar uma atenção especial à investigação dos fenômenos eletromagnéticos. Assim como Oersted, Faraday acreditava que deveria haver uma unidade entre as forças da natureza. Em busca de evidências experimentais dessa unidade, ele pensava no problema inverso ao de Oersted, ou seja, como gerar uma corrente elétrica a partir do eletromagnetismo. Outro problema, que também motivou suas investigações na interface eletricidade-magnetismo, era verificar se um fio transportando corrente seria capaz de induzir uma corrente entre outro fio colocado próximo a ele, do mesmo modo que um corpo eletrizado por indução eletrizava um corpo eletricamente neutro situado em suas proximidades (PEDUZZI, 2008c, p. 109, CRUZ, 2005, p.121).

A busca de respostas a essas questões levou Faraday à descoberta do fenômeno da indução eletromagnética. Uma corrente elétrica variável

em um condutor seria capaz de produzir em outro, uma corrente, também variável; bem como, um ímã em movimento, poderia induzir uma corrente elétrica em um circuito próximo a ele.

Na interpretação desses fenômenos eletromagnéticos, Faraday introduz uma importante inovação. Inspirando-se na configuração assumida pela limalha de ferro, espalhada sobre uma superfície de papel, ao sofrer a ação de um ímã, ele propôs o modelo de “linhas de força” que se estendiam em torno do ímã, saindo de seu polo norte e convergindo em seu polo sul.

Assim, a atração entre os polos diferentes de dois ímãs era explicada por uma afinidade entre as linhas divergentes de um e as linhas convergentes de outro; enquanto que a repulsão entre polos homólogos resultaria de um antagonismo das linhas convergentes (dois polos Sul), ou das linhas divergentes (dois polos Norte). O conjunto das linhas de força de um ímã foi chamado por Faraday de campo magnético. Com a extensão desse modelo à eletrostática, a interação entre cargas elétricas passa a ser compreendida como ação de um campo elétrico formado por linhas de força que emergem de carga positiva e convergem em uma carga negativa (BEN-DOV, 1996, p.100).

A abordagem de Faraday explicita com clareza a sua divergência da concepção newtoniana de força. Em sintonia com Oersted, Faraday acreditava que os efeitos magnéticos se estendiam à circunvizinhança dos fios, preenchendo o espaço nas proximidades do ímã. A ideia de uma força atuando instantaneamente à distância, vista com reservas por Isaac Newton, mas adotada pela maior parte de seus sucessores, não era aceita por Faraday. Com o conceito de campo, o problema da ação à distância desaparece.

O campo de Faraday, de certo modo, fortaleceu “a pertinência do conceito cartesiano de éter” e suscitou em alguns a ideia de que a conexão entre os fenômenos elétricos e magnéticos poderia também abarcar os fenômenos ópticos.

[...] os cientistas de meados do século XIX reconheciam no éter o substrato das vibrações luminosas. Assim, os que aceitavam as ideias de Faraday imaginavam o espaço cheio, em parte, de um éter que seria o suporte das ondas luminosas e, em outra, de linhas de força elétrica e magnética. Parecia sensato procurar unificar esses dois conceitos, definindo um meio único que preencheria o espaço e transmitiria as influências ópticas, elétricas e magnéticas. O próprio Faraday

pensava que as ondas luminosas são vibrações que percorrem suas linhas de campo – à imagem das vibrações que se propagam ao longo de um fio esticado (BEN-DOV, 1996, p.101).

Faraday não logrou transformar a sua suposição de que a luz deveria estar associada às vibrações ondulatórias das linhas de força dos campos elétricos e magnéticos em uma teoria óptica bem estruturada. Todavia, esta conjectura terá uma importância fundamental nos trabalhos de James Clerk Maxwell.

5.3 O ÉTER E A TEORIA ELETROMAGNÉTICA

Por volta de 1854, o jovem e notável físico-matemático James Clerk Maxwell (1831-1879) passa a investigar os problemas relativos à conexão entre a eletricidade e o magnetismo. Nessa época os trabalhos experimentais de Faraday eram reconhecidos por toda a comunidade científica. Contudo, a sua abordagem dos fenômenos eletromagnéticos - via o conceito de campo - não era bem aceita por uma parte significativa desta comunidade, uma vez que se opunha radicalmente à concepção newtoniana de uma força agindo instantaneamente à distância e, além disso, não era expressa em linguagem matemática – uma exigência cara àqueles que trabalhavam sob a perspectiva do paradigma newtoniano materializado nos *Principia*.

As teorias newtonianas, vistas como modelo de Ciência, haviam chegado a um alto grau de sofisticação matemática com os trabalhos de Laplace, Lagrange e Poisson. Ampère e outros haviam tratado problemas de eletricidade e magnetismo, e a matematização se mostrara tão poderosa na explicação e quantificação dos fenômenos que uma teoria não matematizada era considerada no mínimo incompleta (CRUZ, 2005, p.182).

Destoando da maior parte de seus contemporâneos ligados à física-matemática, Maxwell não aceitava a concepção de ação instantânea à distância (MARTINS, 2005). Assim, estudou profundamente a obra de Faraday, encantou-se com ela e decidiu dar “corpo matemático” a algumas das concepções do grande

experimentador, em especial o seu conceito de campo (ABRANTES, 1998, p.185).

Em linhas gerais, os trabalhos de Maxwell em eletromagnetismo foram norteados por dois pressupostos fundamentais: a) as ações físicas, em especial as elétricas e magnéticas, são transmitidas contiguamente e não por ação à distância; b) Os fenômenos eletromagnéticos são passíveis de uma explicação mecânica (ABRANTES, 1998, p.185).

Em sintonia com esses pressupostos, Maxwell construiu e aperfeiçoou em sucessivos trabalhos, um engenhoso modelo de éter eletromagnético como mediador das influências elétricas e magnéticas. Em sua obra definitiva, "*Treatise on electricity and magnetism*", publicada em 1873, Maxwell defende a ideia de que as ações elétricas são um fenômeno de tensão do éter ao longo das linhas de força (MARTINS, 2005).

O modelo mecânico para o éter construído por Maxwell, mesmo em sua versão final, era demasiadamente complexo, atribuindo ao éter eletromagnético intrincados movimentos microscópicos que tornavam difícil vê-lo como uma descrição realista da natureza. Não obstante a essas dificuldades, as equações de campo obtidas por Maxwell não apenas explicavam os fenômenos conhecidos, como também ofereciam soluções que permitiam a previsão de novos fenômenos. Tais soluções "correspondiam a vibrações periódicas que emitidas por correntes elétricas alternativas, transportavam uma energia de um ponto a outro do espaço" (BEN-DOV, 1996, p.102).

Ao calcular a velocidade de propagação das influências elétricas e magnéticas no éter, Maxwell obteve um valor próximo àquele determinado experimentalmente para a velocidade da luz. Além disso, verificou que essas ondas apresentavam outras características que correspondiam às propriedades conhecidas da luz (BEN-DOV, 1996 p.102). Como nessa época a natureza ondulatória da luz era aceita por praticamente todos os físicos, tornou-se natural pensar que o éter luminífero e o éter eletromagnético fossem um único meio (MARTINS, 2005).

É interessante observar que, embora o modelo de éter eletromagnético tenha sido fundamental para a construção da teoria eletromagnética de Maxwell, as equações de campo por ele obtidas, vistas de um ponto de vista contemporâneo, eram autônomas em relação ao éter. No entanto, no contexto histórico em que essas equações foram elaboradas, a presença do éter era indispensável; a crença em sua existência estava intimamente vinculada a uma forte concepção científico-filosófica, ancorada na mecânica que sustentava que, assim

como uma onda mecânica, as ondas eletromagnéticas não podiam se propagar no vazio.

Herdeiro de uma longa tradição na Física, Maxwell achava que deveria haver um meio com propriedades elásticas que servisse de intermediário para a propagação das ondas eletromagnéticas. Esse meio seria responsável por armazenar e ceder energia durante a propagação da onda, como ocorre nas ondas numa corda ou nas ondas sonoras. [...]. Porém, notem que em seu último trabalho, ao derivar suas equações, Maxwell usou apenas as propriedades dos sistemas elétricos e magnéticos e a noção de um campo estabelecendo o vínculo entre os sistemas. [...]. Em resumo, o éter não entrou de forma constitutiva na sua teoria, mas apenas como o local no espaço onde os fenômenos eletromagnéticos ocorrem. Hoje interpretamos que na onda eletromagnética a energia é trocada entre os campos elétricos e magnéticos sem necessidade de um meio intermediário. Entretanto, esta interpretação [...] é uma interpretação *a posteriori*, pois Maxwell acreditava na necessidade de um éter (CRUZ, 2005 p.220).

Com a formulação de sua teoria eletromagnética, Maxwell integrou em um mesmo quadro teórico a óptica a eletricidade e o magnetismo.

Em 1887, Heinrich Hertz (1857-1894), conseguiu produzir em laboratório as ondas eletromagnéticas previstas pela teoria de Maxwell. Com isso, ao fim do século XIX, no âmbito dos fenômenos eletromagnéticos, as teorias ancoradas no conceito de ação à distância perderam a hegemonia. Nesse período a maior parte dos físicos se convenceu de que a teoria de Maxwell oferecia uma descrição adequada de todos os fenômenos eletromagnéticos e que o éter de fato existia (CRUZ, 2005, p.215; MARTINS, 2005).

5.4 O CONFLITO ENTRE O ELETROMAGNETISMO E A MECÂNICA NEWTONIANA

5.4.1 Introdução

Após a emergência da teoria eletromagnética de Maxwell, o éter trouxe para o primeiro plano da discussão dos fundamentos da ciência física, o conflito entre o bem consolidado paradigma da mecânica clássica e o jovem paradigma da teoria eletromagnética de Maxwell.

Ora, sendo o éter o meio necessário à propagação das ondas eletromagnéticas, seria em relação a ele que a velocidade dessas ondas deveria ser calculada. Como este éter deveria preencher todo o espaço, o espírito mecanicista, prevalente à época, induziu muitos a verem no éter eletromagnético a possibilidade concreta de materialização do espaço absoluto de Newton. Assim, um movimento absoluto seria um movimento em relação ao éter.

De acordo com o princípio da relatividade, dois observadores em movimento inercial devem observar as mesmas leis físicas. A mecânica newtoniana satisfazia a esse princípio; porém, a teoria eletromagnética, nos moldes em que ela existia em fins do século XIX, não.

Todavia, será que a violação do princípio da relatividade pela teoria eletromagnética poderia ser detectada? Haveria alguma experiência eletromagnética cujo resultado dependesse do movimento absoluto do observador em relação ao éter?

Em linhas gerais, os principais modelos de éter, vigentes no último quartel do século XIX, permitiam a concepção de experimentos que possibilitassem a verificação de tal conflito. Todavia, conforme salientado por Maxwell, em carta ao físico David Peck Todd, em 1879, o movimento da Terra através do éter só poderia ser detectado, em experiências terrestres que fornecessem medidas de segunda ordem na razão $(v/c)^2$: um valor que julgara ser indetectável com a técnica experimental disponível em sua época. Poucos anos após esta avaliação, um notável perito em medições da velocidade da luz, o norte americano Albert Abraham Michelson (1852-1931), demonstraria à comunidade científica que Maxwell subestimara a precisão da técnica experimental (PAIS, 1995, p.125).

5.4.2 O experimento de Michelson-Morley

Em 1881, Michelson estava em Berlin realizando trabalhos de pós-graduação, quando desenvolveu um sofisticado instrumento

potencialmente capaz de medir os efeitos de segunda ordem na velocidade da luz. Esse instrumento ficou conhecido como interferômetro Michelson.

As experiências de Michelson foram realizadas em Berlim e no Observatório de Astrofísica de Potsdam, cidade vizinha. O objetivo explícito de seu experimento era detectar os efeitos do movimento da Terra em relação ao éter - o “vento do éter” - sobre a velocidade da luz. Em linhas gerais, o método usado por Michelson consistia em comparar os intervalos de tempo necessários para um feixe de luz percorrer a mesma distância em dois trajetos diferentes: um paralelo à velocidade de translação da Terra e outro, perpendicular a esta distância. Neste arranjo experimental, a existência de um éter estacionário deveria provocar uma diferença entre os tempos, equivalente a um excedente de 0,04 do comprimento de onda da luz amarela que viajava na direção paralela ao movimento da Terra. Esse efeito poderia ser mensurado produzindo-se a interferência dos feixes paralelo e perpendicular (PAIS, 2005, p.126).

Os resultados desses experimentos foram negativos. Não houve qualquer evidência de um vento do éter. A conclusão era surpreendente. Contudo, nem Michelson, nem outros membros ilustres da comunidade científica da época, como Lord Rayleigh e Willian Thomson (posteriormente Lord Kelvin) consideraram que essas medidas eram conclusivas (SHANKLAND 1964).

Em 1887, Michelson resolve repetir o experimento de Potsdam. Dessa vez conta com a colaboração de Edward William Morley (1838-1923). Neste novo experimento, Michelson e Morley seguem as mesmas linhas gerais utilizadas em Potsdam. Constroem um novo interferômetro bem mais preciso, adotando várias precauções para minimizar as influências perturbadoras. Mais uma vez o resultado foi negativo. Nenhuma influência do movimento da Terra sobre a velocidade da luz foi detectada (RIVAL, 1996, p. 97).

Tal resultado se constituía uma anomalia em relação à mecânica clássica, assentada no princípio da relatividade de Galileu. Porém, dada a meticulosidade com a qual o experimento havia sido realizado, a comunidade científica não podia desconsiderá-lo. Se por um lado isto causava certo desalento, por outro obrigava os cientistas a buscar uma revisão dos fundamentos da física estabelecida. Como observa Pais:

Compreensivelmente, o resultado negativo representou, no primeiro momento, um desapontamento não apenas para os autores, mas também para Kelvin, Rayleigh e Lorentz.

Contudo, e o mais importante, o resultado experimental foi aceito. Havia com certeza uma falha na teoria. [...]. Numa conferência no Royal Institution em 27 de abril de 1900, Kelvin referiu-se à experiência [...] e caracterizou o resultado como uma nuvem do século XIX sobre a teoria dinâmica da luz (PAIS, 2005, p.127).

Para Michelson e seus contemporâneos aceitar este resultado não era, do ponto de vista psicológico e epistemológico, uma tarefa fácil. Para eles, o éter era uma realidade física. Assim, era necessário “salvar o éter” e construir uma explicação plausível e racional para o resultado negativo da experiência. Como se verá a seguir, Lorentz e Fitzgerald, trabalhando de forma independente, construirão uma engenhosa hipótese para resolver a crise que se instalara na física, submetendo a anomalia aos cânones sagrados da física clássica.

5.4.3 A explicação de Lorentz e Fitzgerald

Em um breve artigo intitulado “O éter e a atmosfera terrestre”, publicado em 1889 na revista americana *Science*, o físico irlandês George Francis Fitzgerald (1851-1901) apresenta uma interessante hipótese para explicar o resultado negativo da experiência de Michelson-Morley e, ao mesmo tempo, manter a ideia do éter.

[...]. Eu sugeriria que o comprimento dos corpos materiais se modifica (na direção de seu movimento no éter) de uma quantidade que depende do quadrado da razão entre as suas velocidades e a da luz. Sabemos que as forças elétricas são afetadas pelo movimento dos corpos eletrificados em relação ao éter, e parece ser uma suposição não improvável que as forças moleculares sejam afetadas pelo movimento e que, em consequência, o tamanho do corpo se altere (FITZGERALD, apud, PAIS, 2005, p. 139).

Algum tempo depois, o físico holandês H.A Lorentz, trabalhando de forma independente, levanta a mesma hipótese de contração dos corpos em movimento para explicar o resultado negativo da experiência de Michelson-Morley. Esta hipótese aparece em seu primeiro artigo sobre a teoria eletromagnética atomística, publicado em 1892. O

resultado da nova experiência de Michelson perturbara o espírito de Lorentz:

Esta experiência me intriga há muito tempo; por fim, só consegui pensar numa maneira de reconciliá-la com a teoria de Fresnel, que consiste na suposição de que a linha que une dois pontos de um corpo sólido, se inicialmente é paralela à direção do movimento da Terra não conserva o mesmo comprimento quando é subsequentemente rodada de 90° (LORENTZ, apud PAIS, 1995, p. 141).

Segundo Lorentz, se o comprimento na direção perpendicular ao movimento da Terra for l , então a hipótese do éter de Fresnel poderia ser mantida, no caso do comprimento na direção paralela ao movimento da Terra ser:

$$l' = l \left[1 - \frac{v^2}{2c^2} \right]$$

Para interpretar esse resultado Lorentz supõe que as forças moleculares, como as eletromagnéticas, “atuam por meio de uma intervenção no éter”. Embora desconhecesse até então o trabalho de Fitzgerald, as conclusões de Lorentz estavam em perfeita sintonia com a proposta de Fitzgerald: “salvar o éter por sua intervenção dinâmica na ação das forças moleculares” (PAIS, 1995, p.141).

Em um artigo publicado 1895, intitulado “A experiência interferencial de Michelson”, Lorentz desenvolve melhor as suas ideias e destaca que ele e Fitzgerald haviam desenvolvido a hipótese de contração de forma independente, um reconhecimento que já havia feito em trabalhos anteriores (PAIS, 1995, p. 141; LORENTZ, 1971, p.7).

Segundo Lorentz, a luz era de fato influenciada pelo movimento da Terra no éter; contudo, a distância que ela devia percorrer também sofria esta influência. Deste modo, a duração do trajeto dos raios luminosos para percorrer os dois braços do interferômetro, que era a grandeza medida por Michelson e Morley, mantinha-se constante. Ambos os raios luminosos chegavam ao mesmo tempo, como se tivessem percorridos distâncias iguais, com a mesma velocidade.

Esta explicação, contudo, apresentava dois problemas: (a) estava em completo desacordo com a mecânica clássica, uma vez que a invariância do comprimento de um corpo em diferentes referenciais

ineriais era assegurada pelas transformações de Galileu; (b) a contração do comprimento não era detectável por uma medição direta, uma vez que, ao se medir o comprimento do braço longitudinal, o próprio instrumento de medição (régua, trena, etc..) se contraía fazendo com que o comprimento medido fosse idêntico ao obtido quando o interferômetro estivesse em repouso (PEDUZZI, 2008c, p.132; BEN-DOV, 1996, p. 108).

O recurso à hipótese *ad hoc* da contração, para explicar o resultado negativo da experiência de Michelson-Morley, era um procedimento que não satisfazia plenamente muitos membros da comunidade científica. Lorentz estava consciente desses problemas e procurava uma teoria que explicasse por que a velocidade da luz não é afetada pelo movimento do observador em relação ao éter. Pensou em modificar a sua fórmula de contração, a fim de que ela eliminasse todas as diferenças, mas aos poucos foi se convencendo de que a construção de uma teoria, na qual a velocidade da luz e as equações de Maxwell fossem independentes do movimento do observador em relação ao éter, exigia algo mais do que a hipótese da contração longitudinal. Seria necessário postular uma desaceleração dos processos físicos que ocorrem nesses corpos, o que equivalia a supor que os batimentos de um relógio em movimento em relação ao éter eram desacelerados. Isso implicava em uma dilatação do tempo indicado pelo relógio em movimento (BEN-DOV, 1996, p.109).

Em relação às hipóteses de contração do comprimento e dilatação temporal é importante avaliar que, para Lorentz, o tempo medido pelo relógio em movimento não era o tempo verdadeiro; do mesmo modo, o espaço medido por uma régua na direção de seu movimento no éter também não é o espaço verdadeiro.

Mantendo-se fiel à concepção do éter estacionário como uma entidade física, Lorentz estabelece uma clara distinção entre o tempo medido por um relógio em movimento em relação ao éter – o “tempo local” – e o tempo medido por um relógio em repouso – o “tempo real” – o tempo absoluto, postulado por Newton (STACHEL, 2005).

Ora, os resultados experimentais não permitiam evidenciar a contração do espaço e a dilatação do tempo. Em outros termos, esses resultados independiam do movimento do observador, e era precisamente isto o que Lorentz queria demonstrar. Assim, nenhuma experiência permitia distinguir entre um relógio em repouso absoluto e um relógio em movimento absoluto.

Dentro deste espírito, o “éter estava salvo”. Ele intervinha na teoria física e, realmente, modificava o comprimento e a duração dos

processos físicos dos corpos em movimento. Paradoxalmente, no entanto, esses efeitos eram inobserváveis.

Assim, as hipóteses de contração do comprimento e dilatação do tempo são articuladas por Lorentz ao seu esforço de construção de uma teoria eletrodinâmica atomística. Esta teoria conseguia explicar os resultados de todos os experimentos ópticos em primeira ordem em v/c .

No entanto, a teoria continuava incompleta. No início do artigo “Fenômenos eletromagnéticos em um sistema que se move com qualquer velocidade inferior a da luz” publicado em 1904, Lorentz destacava o problema então vigente:

Quando se procura determinar, através de considerações teóricas, a influência que poderia exercer sobre os fenômenos elétricos e magnéticos uma translação, como por exemplo aquela a que todos os sistemas estão sujeitos por virtude do movimento anual da Terra, chega-se à solução de maneira relativamente simples quando apenas for necessário considerar aquelas grandezas que são proporcionais à primeira potência da relação entre a velocidade de translação w e a velocidade da luz c . Maiores dificuldades levantam, porém, os casos em que sejam detectáveis quantidades de segunda ordem, isto é, da ordem de w^2/c^2 . O primeiro exemplo deste género é a bem conhecida experiência interferencial de Michelson, cujo resultado negativo nos levou, a mim e a Fitzgerald, à conclusão de que as dimensões dos corpos rígidos se modificam um pouco em consequência do seu movimento através do éter (LORENTZ, 1971, p.13).

A seguir, Lorentz comenta os resultados de outras experiências recentes em que se procurou investigar um efeito de segunda ordem, causado pelo movimento de translação da Terra. Cita os trabalhos de Rayleigh (1902) e Brace (1904) que investigavam se o movimento da Terra podia conferir a um corpo a propriedade de produzir a dupla refração. Destaca também o trabalho conjunto de Trouton e Noble que tentaram detectar a presença de um torque sobre um condensador carregado e ajustado de tal forma que os seus pratos fizessem um certo ângulo com a direção de movimento da Terra. Este torque era previsto pela teoria do elétron de Lorentz. Em todos esses experimentos os

resultados foram negativos. O movimento da Terra em relação ao éter não foi detectado.

Além desses resultados negativos, Lorentz comenta as críticas às hipóteses *ad hoc* que havia introduzido em sua teoria, a fim de explicar a ausência dos efeitos de segunda ordem.

[...]. Em relação à teoria até agora aplicada aos fenómenos elétricos e ópticos dos corpos em movimento, Poincaré opôs como objecção o fato de ter sido necessária a introdução de uma nova hipótese para explicar o resultado negativo de Michelson, e de isto poder vir a ser necessário cada vez que novos factos se tornem conhecidos. É sem dúvida um pouco artificial este recurso à invenção de hipóteses especiais para cada novo resultado experimental (LORENTZ, 1971, p.15).

Em seguida Lorentz anuncia que, após anos de trabalho, conseguiu chegar a uma teoria em que as leis do eletromagnetismo se mantem invariantes em diferentes referenciais inerciais.

Seria mais satisfatório que fosse possível mostrar, por meio de certas hipóteses fundamentais e sem desprezar termos de nenhuma ordem de grandeza, que muitas acções eletromagnéticas são completamente independentes do movimento do sistema. Há alguns anos tinha eu já procurado construir uma teoria deste género. Creio que é agora possível tratar o assunto com melhor resultado. A velocidade será apenas sujeita à restrição de ser menor o que a velocidade da luz (LORENTZ, 1971, p.15).

Nesse artigo Lorentz apresentou uma teoria sistemática e abrangente; deu uma forma definitiva as equações de transformação que permitiam, a partir do conhecimento das leis para um referencial em repouso, deduzir os fenômenos em um referencial em movimento. Com a ajuda dessas transformações, conhecidas atualmente como transformações de Lorentz, ele conseguia explicar em principio todos os fenômenos da eletrodinâmica de corpos em movimento (RENN, 2005).

Não obstante esses méritos da teoria de Lorentz, ela continha uma série de suposições *ad hoc* tais como: a presença do éter, a contração do comprimento, a dilatação do tempo, a distinção entre um tempo real e

um tempo local. Para alguns espíritos da época, que em sintonia com o ideário positivista de Ernst Mach, queriam excluir da física todo conceito que não fosse baseado na experiência empírica, a bem sucedida teoria de Lorentz apresentava problemas (RENN, 2005).

O jovem Albert Einstein (1879-1955) era um desses espíritos que, por questões de princípio, não se satisfaziam com as concepções científicas epistemológicas subjacentes à teoria de Lorentz.

5.5 A RESOLUÇÃO DO CONFLITO ENTRE A MECÂNICA E O ELETROMAGNETISMO – A RELATIVIDADE ESPECIAL

Em junho de 1905, apareceu no periódico *Annalen der Physik*, um trabalho que conferia ao eletromagnetismo uma abordagem original e inusitada, que se tornaria um dos marcos de uma nova revolução científica no campo da física. O artigo intitulava-se “Sobre a Eletrodinâmica dos corpos em movimento” e era assinado por Albert Einstein (1879-1955), à época, um jovem funcionário de um escritório de patentes em Berna, na Suíça, um novato e ilustre desconhecido do restrito grupo de grandes cientistas da época.

Além deste trabalho, quatro outros artigos foram submetidos a este periódico; todos considerados seminais para a nova física que começara a se esboçar no início do século XX.

Até o final de 1904, toda a obra de Einstein era constituída de cinco artigos, todos publicados no *Annalen*. Nenhum desses, no entanto, foi considerado excepcional a ponto de fornecer indícios do significado dos cinco artigos submetidos no ano seguinte. Com exceção de alguns amigos, os problemas da física que o atraíam, assim como o seu notável potencial para a física teórica, eram completamente desconhecidos. Como salienta John Stachel:

Alguém próximo a ele, tal como sua colega no curso de Física e, posteriormente, sua esposa, Mileva Maric, ou o velho amigo e colega no Departamento de Patentes, Michele Besso, teriam estado mais bem preparados para o que estava por vir. Essas pessoas sabiam que, pelo menos desde seus dias de estudante na Politécnica Federal Sueca (1896-1900), o jovem Einstein estava preocupado com os fundamentos da física teórica. Ele estava testando tanto a solidez quanto a fraqueza do edifício erigido por seus predecessores nesse campo e já começava a

sugerir modificações em seus fundamentos (STACHEL, 2005, p.5).

Retornando ao artigo “Sobre a Eletrodinâmica dos corpos em movimento”, logo no primeiro parágrafo Einstein anuncia a sua divergência teórica e estética com a interpretação conferida por seus contemporâneos à teoria eletromagnética de Maxwell, quando aplicada a corpos em movimento:

Como é sabido, a Electrodinâmica de Maxwell – tal como actualmente se concebe – conduz, na sua aplicação a corpos em movimento, a assimetrias que não parecem inerentes aos fenómenos. Consideremos, por exemplo, as acções eletrodinâmicas entre um ímã e um condutor. O fenómeno observável depende aqui unicamente do movimento relativo do condutor e do ímã, ao passo que, segundo a concepção habitual, são nitidamente distintos os casos em que o móvel é um, ou o outro desses corpos (EINSTEIN, 1971a, p.47).

Argumenta que, exemplos deste tipo, somados ao insucesso de várias experiências que tentaram detectar o movimento da Terra em relação ao éter, levaram-no à *suposição* de que, assim como na mecânica, também na eletrodinâmica os fenômenos não devem exibir nenhuma característica que possa ser associada à ideia de um repouso absoluto. Salienta que as experiências realizadas até então sugerem que, em todos os referenciais em que as leis da mecânica são válidas, as leis da óptica e da eletrodinâmica também o são (EINSTEIN, 1971a, p. 48).

Após essas explicações, declara que elevará esta suposição ao status de postulado, ao qual ele chama de princípio da relatividade. Em seguida apresenta um segundo postulado, aparentemente incompatível com o primeiro, pois afirma que “a luz, no espaço vazio, se propaga sempre com uma velocidade determinada, independente do estado de movimento da fonte luminosa” (EINSTEIN, 1971a, p. 48).

A incompatibilidade entre os dois postulados ao qual Einstein se refere, de fato, é apenas aparente. Na sua abordagem o princípio da relatividade se constitui em uma reformulação radical do, até então hegemônico, princípio da relatividade galileano. Agora este princípio estabelece que, para todos os observadores em movimento relativo e uniforme, as leis da física - não apenas as da mecânica - são as mesmas,

consequentemente, a velocidade da luz deve ser constante para todos os referenciais inerciais.

Esses dois postulados, segundo Einstein, são suficientes para a consecução do seu propósito de construir uma eletrodinâmica de corpos em movimento “simples e livre de contradições, baseada na teoria de Maxwell para corpos em repouso” (EINSTEIN, 1971a, p. 48).

Nessa perspectiva, a exigência de um éter como suporte das vibrações luminosas e eletromagnéticas em geral, torna-se supérflua, uma vez que essa nova teoria dispensa a introdução de um espaço e de um tempo absolutos. Para dar conteúdo físico aos seus dois postulados e explorar as suas consequências Einstein faz as seguintes considerações:

Essa teoria vai apoiar-se - como qualquer outra Electrodinâmica - na cinemática do corpo rígido, uma vez que as proposições de uma teoria deste género consistem na afirmação de relações entre corpos rígidos (sistemas de coordenadas), relógios e processos electromagnéticos. A insuficiente atenção a este facto é a raiz das dificuldades com que presentemente se defronta a electrodinâmica dos corpos em movimento (EINSTEIN, 1971a, p.48-49).

A seguir, Einstein passa a explorar as consequências de seus dois postulados, construindo uma nova cinemática que passa em revista o conceito de simultaneidade, expondo a relatividade de comprimentos e tempos e, deduzindo a seguir as transformações de Lorentz e as equações de transformação do campo eletromagnético. Emerge assim a chamada teoria da relatividade especial (VILLANI, 1981).

A nova definição de simultaneidade significa que este conceito perde o carácter absoluto que lhe era atribuído na mecânica newtoniana. Assim, dois eventos caracterizados como simultâneos por um observador S não serão percebidos desta forma por um observador S' que apresente um movimento relativo uniforme em relação a S.

A relatividade dos comprimentos revela que um observador S em repouso e um observador S' em translação uniforme em relação a S medem diferentes comprimentos para uma haste rígida com extremos A e B que esteja em repouso em relação a S' e transladando uniformemente em relação a S segundo a direção AB. No entanto, as medidas efetuadas por S e S' são igualmente válidas.

A relatividade do tempo indica que para os mesmos observadores S e S', relógios que estejam em sincronismo segundo S', não

evidenciam este sincronismo em relação S. Em relação a S os relógios de S' se atrasam.

Uma vez exploradas essas primeiras consequências cinemáticas, Einstein apresenta a sua “Teoria de transformação das coordenadas e do tempo na passagem de um sistema em repouso para outro que está animado em relação ao primeiro de uma translação uniforme” (EINSTEIN, 1971, p.55). Essa “teoria”, em verdade, é uma recriação das equações de transformação apresentadas por Lorentz em seu artigo de 1904. É importante assinalar que, na época, Einstein não conhecia essas equações; ele as inventou de forma independente, partindo de pressupostos totalmente distintos daqueles usados por Lorentz. Na abordagem einsteiniana, o desenvolvimento dessas equações está indissociavelmente articulado aos dois postulados fundamentais da teoria da relatividade (PAIS, 1995, p. 137; 163).

A partir das transformações de Lorentz, Einstein deduz, para um corpo rígido, a contração de Lorentz-Fitzgerald e a dilatação do tempo. Assim, esses efeitos surgem como consequências lógicas de seus dois postulados basilares, sendo entendidos como puramente cinemáticos (STACHEL, 2005). Todavia, a gênese cinemática dessas relações não foi compreendida de imediato. Em um artigo de 1911, por exemplo, Einstein ainda precisava explicar o caráter cinemático da contração de Lorentz-Fitzgerald:

É confusa a questão de a contração de Lorentz existir ou não. Não existe “realmente”, na medida em que não existe para um observador que se move [com a régua]; existe “realmente” no sentido em que pode, em princípio, ser demonstrada por um observador em repouso (EINSTEIN, apud PAIS, p. 165).

É interessante observar que embora as teorias de Einstein e de Lorentz sejam matematicamente equivalentes e acarretem as mesmas consequências experimentais, elas são completamente distintas em seus fundamentos. Apesar de utilizarem as mesmas equações essas teorias lhes conferem interpretações diferentes.

Para Lorentz, essas equações descrevem o comportamento dos objetos materiais - régua e relógios em movimento - em movimento em relação ao éter: as régua se contraem, os relógios se desaceleram. Esses objetos não medem,

portanto nem o “verdadeiro espaço” nem o “verdadeiro tempo”. Esse espaço e tempo “verdadeiros” são aqueles medidos por um observador em repouso absoluto, que no entanto nada distingue de observadores em movimento em relação ao éter (BEN-DOV, p.112).

Na teoria de Einstein, entretanto, os conceitos de espaço e tempo têm outros significados. A sua definição de espaço é operacional: espaço é aquilo que as réguas medem e, do mesmo modo, o tempo é o que os relógios medem. Sob esse prisma, as medidas de espaço e tempo realizadas por dois observadores em movimento relativo uniforme são igualmente válidas. Cada observador define de forma legítima o seu próprio espaço e o seu próprio tempo.

É impossível dizer se um observador está *realmente* em movimento e um outro *realmente* em repouso: como os relógios de ambos têm o mesmo estatuto, não há “tempo verdadeiro” a que possamos referi-los e determinar assim se estão em repouso absoluto ou em movimento absoluto. O movimento absoluto não existe, [...]. O movimento não é, portanto, uma relação entre um corpo e o espaço (ou o éter), mas unicamente uma relação entre corpos diferentes (BEN-DOV, 1996 p.112).

A assunção dos princípios da relatividade e de invariância da velocidade da luz exigiu uma profunda revisão dos conceitos de tempo e espaço. Na teoria da relatividade especial, esses conceitos deixam de ser absolutos e passam a ser vistos como relativos ao observador que os mede. Espaço e tempo estão intimamente ligados. Esse vínculo foi destacado e explorado pelo matemático Hermann Minkowski:

Daqui em diante os conceitos de espaço e tempo, considerados como autônomos, vão desvanecer-se como sombras e somente se reconhecerá existência independente a uma espécie de união entre os dois (MINKOWSKI, 1971 p.93).

Assim como observadores em movimento relativo medem de forma diferente o espaço e o tempo, a teoria da relatividade mostra que uma situação análoga prevalece para o campo eletromagnético: o seu

valor em um ponto do espaço depende do movimento do observador. Dessa forma, as assimetrias que existiam na teoria eletromagnética desaparecem. A teoria da relatividade resolveu o conflito entre a mecânica e o eletromagnetismo.

5.6 O CONFLITO ENTRE A RELATIVIDADE ESPECIAL E A GRAVITAÇÃO NEWTONIANA – A EMERGÊNCIA DE UMA NOVA GRAVITAÇÃO

A teoria da relatividade ao promover uma profunda revisão dos conceitos da física clássica, permitindo a formulação de uma nova mecânica e uma nova abordagem da teoria eletromagnética resolvera o grande conflito conceitual entre a mecânica e o eletromagnetismo.

Após 1905, Einstein publica vários artigos explorando as consequências da relatividade especial. A elegância da teoria, aliada à sua capacidade para, além de explicar os fenômenos já explicados anteriormente, prever novos fenômenos que deveriam ocorrer nas velocidades próximas à da luz, aos poucos começa a seduzir figuras expressivas da comunidade científica.

No entanto, uma importante questão de ordem conceitual e epistemológica não fora resolvida pela relatividade especial. Esta teoria retirou da física os conceitos newtonianos de tempo e espaço absolutos, mas os referenciais inerciais ainda gozavam do status de referenciais privilegiados para a análise dos fenômenos físicos. Segundo Einstein a teoria da relatividade especial não respondia de forma adequada à indagação de Ernst Mach: “por que distinguir os sistemas de inércia entre todos os outros sistemas de coordenadas” (EINSTEIN, 1982a, p.63).

Além disso, ao estabelecer o valor da velocidade da luz como o valor limite para a propagação de uma interação a teoria da relatividade especial gerou uma incompatibilidade conceitual com a bem estabelecida teoria da gravitação newtoniana, na qual as interações gravitacionais se davam à distância e de forma instantânea. Para Einstein o valor limite imposto pela velocidade da luz era um princípio cuja validade se estendia a todos os domínios da física (BEN-DOV, 1996, p.119). Esta convicção quando contraposta aos notáveis êxitos da mecânica-gravitação newtoniana nos dois últimos séculos, êxitos estes que lhe conferiram um caráter *dogmático e prescritivo* com status de *teoria definitiva*, ilustra bem a dimensão do desafio teórico que Einstein teria que enfrentar para superar esta incompatibilidade.

É em 1907 que Einstein expõe à comunidade científica as suas inquietações em relação a esses problemas da teoria da relatividade.

Neste ano ele publica no Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik o artigo “Sobre o princípio da relatividade e suas implicações”, no qual retoma e analisa com mais profundidade os princípios básicos da cinemática, da eletrodinâmica e da mecânica relativística. Nas quatro primeiras seções deste artigo ele demonstra com clareza que a teoria da relatividade oferecia instrumentos conceituais para a discussão de todas as leis da natureza.

Contudo na seção V – Princípio da relatividade e gravitação – Einstein se propõe a discutir, ainda que de forma preliminar, a possibilidade de estender o princípio da relatividade aos referenciais acelerados e a conexão entre estes e os campos gravitacionais. Sem rodeios ele inicia a seção com uma questão, de natureza teórica e epistemológica, que lhe parecia fundamental.

Até agora aplicamos o princípio da relatividade, ou seja, a suposição de que as leis físicas são independentes do estado de movimento do sistema referencial, apenas para sistemas referenciais não acelerados. É concebível que o princípio da relatividade também se aplica a sistemas que estão acelerados relativamente entre si? (EINSTEIN, 2005, p. 56).

Essa questão, segundo Einstein, poderia ter ocorrido a qualquer um que tivesse examinado as aplicações do princípio da relatividade. Salienta que embora o citado artigo não seja o espaço apropriado para uma discussão detalhada do problema, ele não se furtará a uma tomada de posição.

Dentro deste espírito, toma como objeto de análise dois hipotéticos sistemas de movimento Σ_1 e Σ_2 sob as seguintes condições: Σ_1 está acelerado na direção de seu eixo X, sujeito a uma aceleração de magnitude γ , que é temporariamente constante; Σ_2 se encontra em repouso, mas situado em um campo gravitacional homogêneo que impõe uma aceleração $-\gamma$ sobre todos os corpos, segundo a direção do eixo X.

Argumenta então, que as leis da física são igualmente válidas, quer se tome como referência o sistema Σ_1 ou o sistema Σ_2 , tendo em vista que todos os corpos estão igualmente acelerados no campo gravitacional. Σ_1 e Σ_2 são fisicamente equivalentes, o que o leva escrever:

Pelo presente estado de conhecimento e experiência, não temos razões para supor que Σ_1 e Σ_2 difiram um do outro em qualquer aspecto e na discussão que se segue assumiremos, portanto, uma equivalência completa entre um campo gravitacional e uma aceleração correspondente de um sistema referencial.

Essa suposição estende o princípio da relatividade ao movimento de translação uniformemente acelerado de um sistema referencial. O valor heurístico dessa suposição repousa no fato de que ela permite substituir um campo gravitacional homogêneo por um sistema referencial uniformemente acelerado, sendo esse último caso acessível, em certa extensão, a um tratamento teórico (EINSTEIN, 2005, p.56).

Esta suposição ficaria depois conhecida como “princípio de equivalência”. Na continuidade de sua exposição tece algumas considerações acerca do espaço e do tempo em um sistema referencial uniformemente acelerado, e deriva algumas implicações do princípio da equivalência. Em especial são especulados os efeitos físicos decorrentes da ação de um campo gravitacional sobre o funcionamento dos relógios e as frequências emitidas pelos átomos; e é prevista a deflexão da luz por um campo gravitacional.

A seção V desse artigo pode ser considerada como o marco inicial do longo caminho que conduziria Einstein desde a relatividade especial até a teoria da relatividade geral, na qual ele conclui o seu ambicioso projeto de, a partir do princípio de equivalência, construir uma teoria relativística da gravitação. Este caminho seria “marcado por tentativas, erros e longas pausas até que, finalmente, em 25 de dezembro de 1915, a estrutura da teoria geral, tal como a conhecemos hoje, se expõe diante dele” (PAIS, 1995, p. 209).

Após o artigo de 1907, Einstein passou cerca de três anos e meio sem publicar nada de novo sobre a gravitação. Neste período sua vida particular e profissional passou por várias mudanças, além disso, ele se dedicou a novas investigações em outros temas da física. Contudo, assiná-la Abraham Pais, Einstein tinha o hábito de, em suas cartas, partilhar com os amigos as ideias e os problemas de física que afligiam sua mente. Após analisar várias cartas escritas por Einstein neste período Pais tece as seguintes considerações:

Estas mesmas cartas esclarecem-me sobre a razão do silêncio de Einstein quanto ao princípio da equivalência e as respectivas consequências. Não era a gravitação o mais importante em sua mente. Era teoria quântica (PAIS, 1995, p.222- 223).

Isto não significa, entretanto, que nesses três anos e meio Einstein não tenha refletido sobre a gravitação. Por exemplo, em uma carta para Sommerfeld escrita em 29 de setembro de 1909, Einstein aborda a extensão do princípio da relatividade aos corpos rígidos que giram uniformemente. Em uma conferência sobre as origens da teoria geral da relatividade proferida em Glasgow em junho de 1933, Einstein declarou:

Se [o princípio da equivalência] fosse verdadeiro para todos os processos, isso significaria que o princípio da relatividade deveria ser estendido, de modo a incluir movimentos não uniformes dos sistemas de coordenadas, e se se desejasse obter uma teoria não forçada e natural do campo gravitacional. De 1908 a 1911, preoquei-me com considerações dessa natureza, que não preciso descrever aqui (EINSTEIN, apud. PAIS, 1995, p.224).

Em junho de 1911, Einstein encerrou o seu período de silêncio sobre a gravitação, ao publicar o artigo “Sobre a influência da gravidade na propagação da luz”. Este tema havia sido abordado em seu artigo de 1907. Porém ele não estava satisfeito com o tratamento efetuado. Além disso, na época ele concluíra que o efeito do campo gravitacional terrestre sobre um raio de luz era tão pequeno que dificilmente o valor previsto por sua teoria poderia ser medido em experiências terrestres (EINSTEIN, 2005). Nesse ínterim, no entanto, havia amadurecido a ideia de que a deflexão da luz pelo Sol poderia ser mensurada.

Já num artigo apresentado há quatro anos eu procurei responder à questão da possível influência da gravidade sobre a propagação da luz. Volto agora a este tema, porque não me satisfaz a forma por que então tratei o assunto e, mais ainda, porque vejo agora que uma das mais importantes consequências daquelas considerações pode ser submetida à verificação. Refiro-me ao facto de os raios de luz que passam na proximidade do Sol

sofrerem no seu campo de gravidade, segundo a teoria que se vai apresentar, um desvio, tal que a distância angular entre o Sol e uma estrela fixa observada na sua proximidade é vista com um aumento aparente de quase 1 segundo de arco (EINSTEIN, 1971b, p.127).

Ao final deste artigo, Einstein fez um cálculo aproximado dessa deflexão: um raio de luz que passasse próximo ao Sol sofreria uma deflexão de 0,83 segundos de arco. E, embora reconheça que ainda não dispõe de uma teoria completa, apresenta um problema à comunidade de astrônomos:

Como as estrelas fixas das regiões do céu que são vizinhas do Sol se tornam visíveis quando há eclipses solares, esta consequência da teoria pode confrontar-se com a experiência. [...]. Seria de extrema conveniência que os astrônomos se ocupassem da questão que aqui fica esboçada, ainda que ela se apresente insuficientemente fundamentada com os raciocínios anteriores, ou até inteiramente aventureira. Porque, independentemente de qualquer teoria, levanta-se a questão de saber se os meios de que actualmente se dispõe são capazes de registrar uma influência dos campos de gravidade sobre a propagação da luz (EINSTEIN, 1971b, p.139).

Apesar desse artigo trazer ideias novas para antigas questões como, o princípio da equivalência, o desvio para o vermelho, e a deflexão da luz, ao que parece, o enfoque adotado já havia esgotado as suas possibilidades: “Em 1907 e 1911, Einstein tinha estendido até o limite a abordagem cinemática da gravitação” (PAIS, 1995, p.238).

A situação começaria a mudar a partir de dois artigos escritos em fevereiro e março de 1912, quando Einstein passou a enfrentar um problema de grande complexidade: a formulação de uma nova dinâmica gravitacional. Até então, ele havia percebido que o tratamento dos referenciais acelerados e por extensão dos campos gravitacionais implicavam em uma curvatura do tempo, contudo esta conclusão ainda não havia sido estendida ao espaço, que permanecia plano, ou seja, sujeito à geometria euclidiana.

É no primeiro artigo de 1912 que Einstein se refere publicamente ao problema da curvatura do espaço:

[...] não é, evidentemente admissível, contendo suposições físicas que, mais adiante, podem provar-se incorretas; por exemplo, [as leis da geometria de Euclides] provavelmente não se verificam num sistema em rotação uniforme, no qual, por causa da contração de Lorentz, a razão do perímetro de uma circunferência pelo respectivo diâmetro poderia ser diferente de π se aplicássemos a nossa definição de comprimento (EINSTEIN, apud, PAIS, 1995, p. 238).

No entanto, ele ainda manteve o espaço plano. Em verdade, à medida que Einstein avança rumo a uma nova gravitação, a duras penas, começa a compreender a insuficiência da geometria de Euclides e, simultaneamente, a perceber que lhe faltam ferramentas teóricas essenciais. Em um artigo escrito em julho de 1912 ele declara:

Temos que abandonar a interpretação singela das coordenadas do espaço-tempo, embora não possamos ainda compreender que forma as equações de transformação geral do espaço-tempo assumirão. Peço aos colegas que se dediquem a este importante problema (EINSTEIN, apud, PAIS, 1995, p.249).

Pouco tempo depois desse artigo, em fins de julho e início de agosto de 1912, Einstein entra em contato com as ferramentas matemáticas que procurava. Em uma conferência pronunciada em Kyoto em 1922, ele fala sobre esta busca de uma nova geometria para o espaço-tempo:

Se todos os sistemas [acelerados] são equivalentes, então a geometria de Euclides não pode ser válida em todos eles. Jogar fora a geometria e conservar as leis [físicas] equivale a descrever pensamentos sem palavras. Temos de procurar palavras antes de podermos exprimir ideias. Que devemos procurar a esta altura? Este problema permaneceu para mim insolúvel até 1912, quando, subitamente, vi que a teoria de

Gauss das superfícies contém a chave para resolver o mistério. Compreendi que as coordenadas de superfície de Gauss tinham um significado profundo. Todavia, não sabia então que Riemann tinha estudado as bases da geometria de um modo ainda mais profundo [...]. Compreendi que os fundamentos da geometria têm significado físico. Meu querido amigo, o matemático Grossmann, estava em Zurique quando regressei de Praga para lá. Por ele, eu soube pela primeira vez de Ricci e, mais tarde, de Riemann. Assim, perguntei ao meu amigo se meus problemas poderiam ser resolvidos pela teoria de Riemann [...] (EINSTEIN, apud, PAIS, 1995, p.249).

As geometrias não euclidianas começaram a se desenvolver na segunda metade do século XIX e um dos fatores que motivaram o seu florescimento foi a insatisfação de alguns matemáticos em relação à lógica de sua formulação. O “calcanhar de Aquiles” da geometria de Euclides era o seu quinto postulado, visto com reserva pelos matemáticos que não o consideravam auto-evidente como os demais.

Gerações de matemáticos tentarão em vão suprimir esse postulado demonstrando que ele era de fato um teorema dedutível dos outros postulados. Foi preciso esperar o século XIX para que os matemáticos Nikolai Lobatchesvski, Janos Bolyai e Bernhard Riemann mostrassem que a renúncia ao quinto postulado permite construir várias geometrias, matematicamente coerentes, mas distintas da de Euclides. Nessas geometrias não euclidianas, por exemplo, a soma dos ângulos [internos] de um triângulo não é necessariamente igual a 180° , assim como a relação da circunferência de um círculo com seu diâmetro pode diferir de π (BEN-DOV, 1996, p.122).

Retornando a Einstein, após as primeiras discussões com Grossmann, ele encontra o ponto de partida para a sua teoria relativística da gravitação. No entanto ainda havia um bom percurso a percorrer. O verdadeiro trabalho apenas começara. Em carta escrita a Sommerfeld de 1912 ele declara:

Nos dias atuais, ocupo-me exclusivamente do problema da gravitação e agora creio que conseguirei vencer todas as dificuldades com a ajuda de um amigo matemático. Mas uma coisa é certa: em toda a minha vida nunca trabalhei tanto, enchi-me de grande respeito pela matemática, cuja parte mais sutil eu tinha considerado até hoje, na minha ingenuidade, como mero luxo. Comparada a este problema, a relatividade especial é brincadeira de criança (EINSTEIN, apud, PAIS, 1995, p.254).

Einstein ainda trabalharia mais três anos para a conclusão da relatividade geral, neste percurso além das dificuldades de ordem conceitual, teria que, simultaneamente, familiarizar-se com a complexidade das ferramentas matemáticas que lhe eram necessárias. Neste aprendizado a colaboração de seu amigo Marcel Grossmann foi fundamental.

A versão final da teoria da relatividade geral seria concluída em dezembro de 1915, sendo publicada no início de 1916, no *Annalen der Physik*, com o título “Os fundamentos da teoria da relatividade geral”. A teoria está fundamentada em dois pilares: o primeiro é representado pelas equações de campo, que descrevem a variação do campo gravitacional no espaço e no tempo. O segundo pelas equações de movimento que governam um corpo sob a ação de um campo gravitacional, em substituição as tradicionais equações de Newton. Essas novas equações de movimento, assim como todas as leis da natureza, devem ser válidas para todos os sistemas de referência (INFELD, 1950, p. 102).

Assim, o princípio da relatividade é generalizado para todos os observadores, retirando dos referenciais inerciais o privilégio de que desfrutaram até então. Conforme Einstein:

[...]. As leis da física devem ter uma estrutura tal que a sua validade permaneça em sistemas de referências animados de qualquer movimento. Chegamos deste modo, a um alargamento do princípio da relatividade (EINSTEIN, 1971c, p.144).

Com a teoria da relatividade geral, o princípio da equivalência, vislumbrado por Einstein no experimento imaginário do elevador em

queda livre (EINSTEIN, 1982), ganha finalmente uma estrutura teórica da qual emerge uma nova gravitação.

Em decorrência do princípio da equivalência, tem-se que em um referencial acelerado, como um disco em rotação, ou em um campo gravitacional, a geometria euclidiana deixa de ser válida – o espaço se encurva -, e os relógios localizados em diferentes pontos desse referencial marcam a passagem do tempo em ritmos distintos – sinalizando uma curvatura do tempo (VIDEIRA, 2005; BEN-DOV, 1996, p.124).

Nessa perspectiva, a teoria relativística da gravitação não se diferencia da teoria gravitacional de Newton apenas no nível da linguagem matemática. As diferenças entre as duas teorias situam-se, sobretudo no nível de seus fundamentos.

Na teoria newtoniana o espaço e o tempo são fixos “o espaço tridimensional euclidiano e o tempo absoluto newtoniano constituem uma espécie de palco no qual se desenrolam todos os eventos” (PEDUZZI, 2008c, p.187). Além disso, a atração gravitacional entre os corpos materiais é compreendida como uma força que atua à distância e é transmitida instantaneamente. Assim, qualquer alteração expressiva na massa do Sol no mesmo instante perturbaria os demais corpos celestes do sistema solar.

Em contrapartida, na teoria de Einstein, o tempo e o espaço são entidades físicas intimamente vinculadas, constituindo um espaço-tempo quadrimensional não euclidiano que é suscetível à ação dos campos gravitacionais: “o espaço-tempo é um campo dinâmico com propriedades físicas definidas e que interage com o conteúdo de matéria e energia do Universo” (FALCIANO, 2009).

Ademais, a gravitação não é compreendida como uma força que altera o movimento dos corpos. Todo corpo engendra uma curvatura no espaço-tempo quadrimensional que o circunda. Esta curvatura torna-se expressiva para os corpos de grande massa, como as estrelas e os planetas. Dessa forma a trajetória de um planeta em torno do Sol decorre da curvatura do espaço-tempo criada pelo Sol e, em menor intensidade, pelo planeta (VIDEIRA, 2005). A curvatura do espaço-tempo não é causada pela gravitação, ou causa a gravitação – a curvatura do espaço tempo é a gravitação (PEDUZZI, 2008c, p.187; BEN-DOV, 1996, p.125).

Assim a queda de um objeto, a órbita da Lua ou de um satélite artificial não se devem a nenhuma ação gravitacional à distância. A simples presença da Terra produz uma curvatura no espaço-tempo que determina a trajetória seguida por esses corpos. Como assinala Greene:

Einstein mostrou que os objetos se movem através do espaço (do espaço-tempo, mais precisamente) pelo caminho mais curto possível – o “caminho mais fácil possível”, ou o “caminho de menor resistência”. Se o espaço é curvo, esse caminho também será curvo. [...] o conceito de Einstein expressa uma reformulação da gravidade em termos de um espaço curvo (GREENE, 2001 p.90).

A teoria da relatividade é considerada, desde a sua formulação, como uma das mais belas realizações do espírito humano. Contudo, embora os valores filosóficos e estéticos norteiem a construção de uma teoria, e desempenhem certo papel em sua avaliação (KUNH, 1996), sabe-se também que na tradição científica esses atributos de uma teoria não implicam necessariamente que, os fenômenos nela representados encontrem correspondência na natureza. O confronto entre as previsões de uma teoria e os dados experimentais e observacionais é imprescindível.

Ao longo de quase um século as previsões da teoria da relatividade geral têm sido corroboradas por um grande número experiências e observações astronômicas realizadas com um grau de precisão crescente (GREENN, 2001, p. 103). Nesse contexto, merecem destaque dois eventos que, já nas duas primeiras décadas do século XX corroboraram, ou contribuíram para corroborar a teoria da relatividade geral: a explicação da anomalia do periélio de mercúrio e o desvio da luz pelo campo gravitacional do Sol.

A anomalia do movimento do periélio de Mercúrio era um problema que desafiava os físicos e astrônomos desde meados do século XIX, não tendo sido resolvido pela gravitação newtoniana. Havia uma diferença de 43 segundos de arco entre o valor teórico e o valor mensurado. Apesar de pequena, essa discrepância, ao menos em nível teórico, não podia ser desprezada. Essa pequena diferença foi explicada por Einstein, em 1914, antes mesmo de completar a sua teoria relativística da gravitação. Em seu cálculo ele conseguiu obter o resíduo de 43 segundos. Um resultado notável (VIDEIRA, 2005).

Um segundo evento, à época, de maior impacto do que a explicação para a precessão do periélio de mercúrio foi a detecção do desvio da luz por um campo gravitacional. Conforme mencionado anteriormente, Einstein, já em seu artigo de 1907, previu que a luz

poderia ser desviada por um campo gravitacional. Em seu artigo de 1911 ele indicou que tal fenômeno poderia ser detectado pelos astrônomos durante a ocorrência de um eclipse total do Sol.

Essa sugestão deu ensejo à organização de uma primeira expedição às cidades de Cristina e Passa Quatro em Minas Gerais, visando a detecção experimental do desvio por ocasião de um eclipse solar em 1912. Esta primeira tentativa, no entanto, não foi bem sucedida, em função principalmente do mau tempo na região (EINSENSTAEDT; VIDEIRA, 1995, p. 84-85).

A confirmação da detecção da luz só viria com a observação de um eclipse total do Sol em 29 de maio de 1919. Este eclipse foi fotografado por duas equipes organizadas pela Royal Society e pela Royal Astronomical Society. As observações foram realizadas em Sobral no Ceará e na Ilha do Príncipe na costa africana.

O artigo final com análise das observações foi assinado por Arthur S. Eddington (1882-1944), Frank W. Dyson (1868-1939) e C. Davidson, sendo publicado na Philosophical Transactions, da Royal Society. Três hipóteses eram passíveis de comprovação: um desvio igual a zero; b) um desvio igual a $0,87''$ e c) um desvio de $1,75''$. O primeiro revelaria que um raio luminoso não é afetado pela gravidade, invalidando a teoria de Einstein; o segundo poderia ser explicado por uma combinação da teoria newtoniana com o princípio da equivalência; e o terceiro resultado, que era o esperado por Eddington, corroborava a teoria da relatividade geral (EINSENSTAEDT; VIDEIRA, 1995, p. 96).

Com base nessas análises os pesquisadores não hesitaram em afirmar que os resultados obtidos em Sobral e na Ilha de Príncipe confirmavam a teoria de Einstein.

Essa conclusão, sem dúvida foi de grande importância para comprovação da teoria da relatividade geral. No entanto, muitos cientistas a viram com reserva. E há uma multiplicidade de fatores de natureza técnico-científica que justificam esta atitude:

[...] A própria escolha dos pontos de observação mais propícios para a investigação do fenômeno exigiu estudos prévios sobre as condições meteorológicas do local (chuvas, ventos, variações de temperatura e de pressão, etc.) e da posição do Sol para minimizar efeitos de refração da luz. A calibração dos instrumentos, a tomada das fotografias em condições climáticas não exatamente ideais (por exemplo, com a presença de algumas nuvens) e todo um processo de

revelação das chapas fotográficas e interpretação dos dados ressaltam a dimensão da tarefa dos astrônomos, físicos e técnicos envolvidos nas duas expedições (PEDUZZI, 2008 c, p.192).

Um outro fator, de ordem subjetiva, também deve ser considerado, Eddington era um entusiasta da relatividade geral. É certo que ele adotou uma postura pragmática frente à questão da deflexão de um raio de luz, o que a princípio lhe permitia testar os três resultados teóricos já elencados. Contudo, “a sua opção já havia sido feita antes mesmo da realização das observações. A sua teoria preferida era a ‘Lei de Einstein’” (EINSENSTAEDT; VIDEIRA, 1995, p. 92).

Dessa forma, ainda que não se possa duvidar, da seriedade do trabalho de Eddington e seus colaboradores, há uma margem de subjetividade em suas análises que não pode ser, de todo, desconsiderada. Pois, um dos pontos de consenso da epistemologia contemporânea é o de que todas as observações estão carregadas de teorias (FEYERABEND, 2007, KUHN, 1996; THUILLIER, 1994 POPPER, 1975).

Em relação às duas corroborações da teoria da relatividade geral, aqui comentadas, Steven Weinberg expõe um ponto de vista bem interessante:

Geralmente supõe-se que o verdadeiro teste de uma teoria é o da comparação de suas previsões com resultados experimentais. No entanto, olhando para trás, podemos falar hoje que a explicação bem sucedida de Einstein em 1915 da anomalia previamente medida na órbita de Mercúrio foi um teste muito mais sólido da relatividade geral do que a verificação de seus cálculos da deflexão da luz pelo Sol feita durante a observação do eclipse de 1919 ou nos eclipses subseqüentes. Ou seja, no caso da relatividade geral, uma retrovisão, como o cálculo da anomalia já conhecida do movimento de Mercúrio, acabou fornecendo um teste mais confiável da teoria do que a verdadeira previsão de um novo efeito, a deflexão da luz pelo campo gravitacional (WEINBERG, 1996, p.81).

Apesar das reservas de muitos pesquisadores frente ao resultado fornecido pela observação do eclipse de 1919, prevaleceu na

comunidade científica e círculos intelectuais da época um clima de otimismo e um sentimento de triunfo do intelecto humano sobre os mistérios do universo. Este sentimento foi captado de forma poética pelo filósofo Alfred North Whitehead:

A atmosfera de intensa emoção era exatamente a mesma daquela existente no drama grego. Nós formávamos o coro que comentava os decretos do destino, tal como eles são revelados pelo desenrolar do acontecimento supremo. Havia um elemento dramático naquele cerimonial, tão cênico e tão tradicional, que se dava, tendo como pano de fundo, um retrato de Newton que nos lembrava que a maior das generalizações científicas acabava, naquele exato momento, após mais de dois séculos, de receber a sua primeira modificação. Nenhum interesse pessoal se encontrava em jogo: uma grande aventura do pensamento acabava, enfim, por atracar, e de maneira extremamente bem-sucedida, à margem (WHITEHEAD, apud, EISENSTAED; VEIDEIRA, 1995, p.98).

Como desdobramentos da teoria da relatividade, são previstos novos fenômenos e estabelecidos novos modelos e teorias para o universo. Em 1916, Karl Schwarzschild obtém soluções para as equações de Einstein que sugerem a existência das chamadas “estrelas frias” – atualmente conhecidas como buracos negros. Na década de 1920, Alexander Friedmann (1888-1925) elaborou os fundamentos matemáticos de um universo em expansão; em 1929 as medições precisas de galáxias distantes, efetuadas pelo astrônomo americano Edwin Hubble, permitiram a corroboração desse modelo. Na década de 1940 foi proposto por George Gamow um modelo relativístico do universo em expansão, conhecido atualmente como Big-Bang (GREENN, 2001; OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2004).

Em fins do século XX, alguns físicos e astrônomos começam a enfrentar uma intrigante incompatibilidade teórica entre a relatividade geral e a mecânica quântica. Em linhas gerais, essas estruturas teóricas dividem o universo em duas regiões distintas, sujeitas a duas físicas diferentes: o micro subordinado à mecânica quântica e o macro governado pela relatividade geral (GREENN, 2001). Uma situação curiosa que, de certo modo, lembra antiga dicotomia existente no

universo aristotélico. Dos esforços para superar essa dicotomia, conforme discutido no capítulo 4, resultou a teoria da gravitação newtoniana.

Finalizando esta reconstrução histórica se poderia afirmar, em sintonia com Kuhn (1996), que as teorias modificam a forma como o homem observa o universo. Assim como a teoria de Copérnico e a gravitação de Newton, a teoria relativística da gravitação de Einstein também promoveu este tipo de mudança.

6 APRESENTAÇÃO DE UMA PROPOSTA DE AÇÃO DIDÁTICO-PEDAGÓGICA E OS PROCEDIMENTOS DE PESQUISA

6.1 INTRODUÇÃO

Na reflexão desenvolvida nos capítulos anteriores defendeu-se o argumento de que a história e a filosofia da ciência constituem um corpo de conhecimentos de notável valor pedagógico na educação científica. Todavia, conforme tem assinalado a pesquisa na área, existe um relativo descompasso entre o volume e a qualidade das reflexões e propostas acadêmicas e seus desdobramentos no campo das ações empíricas em sala de aula.

Neste capítulo, balizado pela reflexão educacional e histórico-epistemológica desenvolvida anteriormente, delineou-se as linhas gerais de uma proposta de ação didático-pedagógica inspirada em uma concepção de educação progressista, com referência em Paulo Freire, que tem como elemento indissociável da relação professor-aluno a dialogicidade e a problematização do conhecimento, sendo esta última o eixo norteador da ação docente e, conseqüentemente, do planejamento e desenvolvimento das atividades em sala de aula.

A proposta foi materializada em uma sequência didática composta por duas unidades: a primeira, abordando a revolução copernicana e a gênese da gravitação newtoniana; e a segunda, contemplando as transformações nas teorias e conceitos científicos que permitiram a emergência da gravitação einsteiniana.

A sequência foi implementada na disciplina Evolução dos Conceitos de Física, oferecida no 4º ano do Curso de Licenciatura em Física da Universidade do Estado de Mato Grosso do Sul – UEMS, na qual o pesquisador é docente.

Com a implementação da sequência didática buscou-se enfrentar o desafio de trabalhar com os estudantes conceitos e teorias científicas à luz da história da ciência e de algumas das reflexões epistemológicas contemporâneas. O que se almeja é oportunizar aos futuros professores o acesso a ferramentas conceituais úteis ao trabalho de articulação de elementos históricos e epistemológicos às suas práticas docentes, nos distintos níveis de ensino.

6.2 ASPECTOS GERAIS DA METODOLOGIA DA PESQUISA - OS INSTRUMENTOS PARA A COLETA DE DADOS

Antes de se apresentar os instrumentos utilizados para a coleta de dados na pesquisa, convém destacar que a questão central que norteou a presente investigação foi a de analisar se em um curso de Licenciatura em Física, na disciplina Evolução dos Conceitos de Física, uma proposta de ação didático-pedagógica fundamentada nas reflexões contemporâneas da história e filosofia da ciência pode contribuir para desenvolver nos licenciandos uma melhor compreensão da natureza da ciência e do processo histórico de construção das teorias e conceitos científicos, integrando esta compreensão à sua reflexão sobre o ensino de física. Que fatores, ligados ao contexto didático e à formação geral e científica do estudante, se interpõem à consecução desse objetivo?

Sob este prisma, o presente trabalho se configura como uma pesquisa de natureza qualitativa. Neste tipo de pesquisa as informações advindas do contexto em que atuam os sujeitos participantes, no caso educador e educandos, assim como as suas diferentes perspectivas em relação à forma de condução, problemas, potencialidades e limites do trabalho, ganham uma especial relevância para a sua análise.

Como assinalam Bogdan e Biklen (1994), as características fundamentais dessa metodologia são: (a) o contato direto e prolongado do pesquisador com o contexto e a situação que está sendo investigada; (b) os dados coletados apresentam o caráter, predominantemente, descritivo, podendo incluir, por exemplo: transcrições de entrevistas; depoimentos, gravações em vídeo, descrição de pessoas, acontecimentos e situações; (c) evidencia uma preocupação com o processo, não se limitando apenas aos resultados e ao produto; (d) procura levar em conta as diferentes perspectivas com que os sujeitos participantes concebem as questões que estão sendo contempladas.

Nessa perspectiva, a coleta de dados empíricos necessários à análise do trabalho de intervenção didática utilizou os seguintes instrumentos (a) Um questionário aplicado ao final de cada uma das unidades da sequência didática. Devendo-se salientar que esses questionários compuseram uma das formas de avaliação da disciplina, e foram respondidos pelos estudantes sem nenhuma fonte de consulta; (b) entrevistas semiestruturadas realizadas após cada uma das unidades da sequência; (c) as observações do pesquisador durante os encontros, que permitiram a caracterização da turma, subsidiaram a composição dos roteiros das entrevistas e ao longo destas foram cotejadas com a perspectiva apresentada pelos estudantes.

6.3 A DISCIPLINA EVOLUÇÃO DOS CONCEITOS DE FÍSICA NO CONTEXTO DA PESQUISA

A disciplina Evolução dos Conceitos de Física ou similar ligada à história da Física está presente atualmente em muitos Cursos de Física do país, tanto na licenciatura quanto no bacharelado, em caráter optativo ou obrigatório, constituindo-se muitas vezes na única oportunidade que os licenciandos ou bacharelados têm de entrar em contato com a história da Física e, eventualmente com algumas das reflexões contemporâneas da história e filosofia da ciência. Em vários cursos, a disciplina não existe, e naqueles em que ela é oferecida a história da FÍSICA muitas vezes se desenvolve segundo uma abordagem factual e técnica, desarticulada das reflexões dos filósofos da ciência contemporâneos (STAUB, 2005; PEDUZZI, 2007).

No Curso de Física da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, a disciplina Evolução dos Conceitos de Física possui uma carga horária de 68 horas-aula, e desde 2009 é oferecida na quarta série (correspondente ao sétimo e oitavo semestres nos regimes semestrais), nos períodos diurno e noturno, cujos cursos possuem a mesma estrutura curricular. Oficialmente a disciplina não possui pré-requisitos, embora seja aconselhável que o aluno tenha cursado, ao menos, as disciplinas básicas das duas primeiras séries. Em anos anteriores (2003-2008) a disciplina foi oferecida na terceira série (correspondente ao quinto e sexto semestres) também em ambos os períodos. O Curso é relativamente recente tendo iniciado as atividades no segundo semestre de 2000, com a habilitação em Licenciatura, não havendo, ainda, o Bacharelado.

Os objetivos expressos da disciplina “Evolução dos Conceitos de Física” são:

Permitir, ao aluno, a aquisição de uma visão da evolução dos conceitos físicos ao longo do tempo e dos momentos de impasse, caracterizados pelas revoluções científicas. Levá-lo a compreender a importância da Física no mundo contemporâneo e a pensar o seu papel na sociedade atual (UEMS/FÍSICA, 2005, p. 32).

Na ementa constam os seguintes conteúdos: A Física da Antiguidade; A descrição do sistema planetário; Ptolomeu e Copérnico;

A Renascença. Galileu; Newton e a Revolução Científica; A Física e a Revolução Industrial; As Revoluções Científicas Modernas: Planck e Einstein; A Física do mundo contemporâneo; Principais correntes da Filosofia da Ciência; A Filosofia da Ciência e o seu impacto no ensino de Física; O papel social da Física (UEMS/FÍSICA, 2005, p. 32).

A bibliografia básica é sucinta; no campo da reflexão epistemológica contemporânea constam as obras: A Estrutura das Revoluções Científicas (KUHN, 1996) e A Construção das Ciências (FOUREZ, 1995); as reflexões filosóficas dos físicos Mario Schemberg e Roland Omnès estão presentes em: Pensando à Física (SCHEMBERG, 2001) e Filosofia da Ciência Contemporânea (OMNÈS, 1996); aparecem ainda os clássicos: O Ensaíador (GALILEI, 1999), os Principia (NEWTON, 1990) e uma obra de divulgação de Einstein: A Teoria da Relatividade Especial e Geral (EINSTEIN, 1999). Na bibliografia complementar aparecem: A formação do espírito científico (BACHELARD, 1996), O Discurso do Método (DESCARTES, 1999); A Evolução da Física (EINSTEIN; INFELD, 1971) e Convite à Filosofia (CHAUÍ, 1988).

Pelo que foi apresentado nos parágrafos anteriores, percebe-se que o currículo oficial sinaliza uma aproximação com as reflexões epistemológicas contemporâneas. Todavia sabe-se que não é incomum haver uma certa distância entre os currículos oficiais e os currículos reais. No contexto da UEMS esse relativo distanciamento também se verificava. De fato, o perfil do quadro docente do Curso, mesmo entre aqueles que atuaram na disciplina (salvo algumas exceções), está mais em sintonia com uma abordagem histórica factual, enciclopédica e técnica, ou com a pseudo-história, a quase-história e outras formas menos nobres de apresentação da história da ciência (BALDINATO; PORTO, 2007; ALLCHIN, 2004; WHITAKER, 1979).

Dessa forma, a disciplina Evolução dos Conceitos de Física não se encontrava convenientemente articulada às reflexões dos filósofos e historiadores da ciência contemporâneos, e também não contemplava os possíveis desdobramentos dessas reflexões no ensino de Física, nos anos anteriores ao desenvolvimento da componente empírica desta pesquisa pelo professor-pesquisador.

6.4 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA TURMA

No contexto da pesquisa, os sujeitos que participaram da experiência didática eram alunos regularmente matriculados na disciplina Evolução dos Conceitos de Física. A turma era formada por 7

alunos, sendo 2 rapazes e 5 moças, todos participaram da experiência. A faixa etária dos estudantes situava-se entre 21 e 34 anos, sendo média de idade 25 anos. A maior parte do grupo (5 alunos) iniciou o Curso em 2007, havendo 2 alunos que ingressaram em 2005 e 2006, todos provenientes de Escolas Públicas da Rede Estadual de Mato Grosso do Sul.

Nos primeiros contatos com os estudantes, o professor-pesquisador procurou obter informações sobre as suas leituras anteriores na área de história e filosofia da ciência. Alguns declararam que apenas na disciplina Estágio Supervisionado I (oferecida no 3º ano) haviam discutido alguns textos, outros disseram que nunca leram nada a respeito. Dentre os estudantes que assinalaram ter efetuado algumas leituras de textos históricos, apenas um manifestou certa familiaridade e curiosidade pela história da ciência. Mas, de forma geral, o grupo mostrou-se interessado na disciplina.

Dessa forma, a maior parte dos estudantes forneceu indícios de que, ao iniciar a disciplina, possuía poucos conhecimentos sobre a história e a filosofia da ciência.

6.5 A ELABORAÇÃO E A IMPLEMENTAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A sequência didática, conforme já salientado, foi estruturada em duas unidades. A primeira unidade contemplou o processo histórico de construção de uma nova física para o sistema heliocêntrico proposto por Copérnico, processo que envolveu várias gerações de cientistas e teve na formulação da mecânica e gravitação newtoniana o seu ponto culminante. A segunda unidade contemplou, em linhas gerais, as principais transformações conceituais promovidas por Einstein no início do século XX, que ao postular o Princípio da Relatividade e a constância da velocidade da luz no vácuo, em todas as direções e em todos os referenciais inerciais colocou em xeque os conceitos de tempo, espaço e movimento absolutos, que eram basilares na mecânica newtoniana. Esta mudança conceitual conduziu a um conflito com a gravitação newtoniana, o que se constituiu em principal fonte de inspiração para a formulação de uma nova gravitação, proposta por Einstein na Teoria da Relatividade Geral.

Os tópicos abordados em ambas as unidades são especialmente profícuos a uma abordagem fundamentada nas reflexões contemporâneas da história e filosofia da ciência. É interessante assinalar que, até as primeiras décadas do século XX, a visão histórico-epistemológica predominante sobre a temática contemplada na primeira

unidade era de natureza continuísta e empírico-indutivista. Esta visão, apesar de superada pelos historiadores e filósofos da ciência contemporâneos, ainda tem presença marcante no ensino de física. Em contrapartida, as transformações científicas promovidas pelas relatividades especial e geral forneceram preciosos argumentos às posições anti-empiristas assumidas por Popper e Bachelard, ainda nos anos 30 do século passado.

Dessa forma, a implementação da primeira unidade didática foi pensada com a intenção de, à luz das reflexões contemporâneas da história e filosofia da ciência, propiciar aos estudantes uma reflexão crítica e uma melhor compreensão sobre o processo histórico de produção e transformação das teorias e conceitos científicos, contemplados na unidade. Contrapondo-se, assim, à visão empírico-indutivista e a-histórica implicitamente transmitida aos estudantes ao longo de sua formação.

Complementando as reflexões desenvolvidas na primeira unidade, a segunda contempla um conjunto de transformações científicas que evidenciam de forma mais expressiva as limitações concepção empírico-indutivista.

A intervenção didática, fundamentada na história da ciência e em reflexões epistemológicas contemporâneas, teve como objetivo contribuir para que os licenciandos desenvolvessem uma melhor compreensão dos conceitos e teorias científicas, contemplados na primeira unidade didática. O trabalho visava ainda outro objetivo diretamente vinculado à licenciatura: que a compreensão histórica dos conceitos e teorias científicas fosse incorporada pelos licenciando à reflexão sobre o ensino de física. Dentro deste espírito, foram priorizados os seguintes aspectos:

- Existe uma *interdependência entre a observação e a teoria*. As observações são carregadas de pressupostos teóricos e estes tanto podem ser motores da descoberta científica, como verdadeiros obstáculos ao novo conhecimento.
- A ciência possui uma *historicidade*, apresentando múltiplas dimensões (intrínseca, filosófica, cultural e histórica);
- O conhecimento científico apresenta um *caráter provisório, mutável e inventivo*. As teorias, leis e conceitos científicos são criações do intelecto humano, balizadas pelo diálogo crítico e criativo com a natureza.

- A história e a filosofia podem ser *articuladas ao ensino de física*.

Na definição dos pressupostos acima apresentados consideraram-se os seguintes aspectos: a natureza complexa das interações em sala de aula, as dificuldades cognitivas inerentes ao processo de apreensão das múltiplas dimensões e significados dos eventos históricos, assim como da ampla variedade de questões epistemológicas, muitas delas de difícil apreensão em um primeiro curso de iniciação à história dos conceitos físicos e às questões epistemológicas a eles atinentes, como é o caso da disciplina *Evolução dos Conceitos da Física*, no âmbito do qual se insere a presente proposta.

Assim, em sintonia com as recomendações de Matthews (1998), procurou-se estabelecer metas modestas, passíveis de serem alcançadas pelos estudantes mediante um razoável esforço de leitura e uma ação docente permanentemente direcionada para a construção, em sala de aula, de um ambiente profícuo à reflexão e ao debate, como o proporcionado por uma abordagem dialógica e problematizadora - características essenciais da ação didático-pedagógica proposta pelo pesquisador.

A implementação da sequência didática se efetuou ao longo do desenvolvimento da disciplina. No período que a antecedeu, foram desenvolvidos conteúdos históricos e epistemológicos considerados essenciais para que o estudante desenvolvesse uma reflexão crítica e melhor compreensão acerca do significado científico, histórico e epistemológico das grandes transformações científico-culturais contempladas ao longo do desenvolvimento da sequência. Esta primeira fase, chamada aqui de preliminar, teve seu conteúdo estruturado, basicamente, em duas unidades.

Na unidade A, foram discutidas algumas posições epistemológicas contemporâneas relativas ao indutivismo, ao problema da indução e à relação entre a observação e a teoria. Foi empreendida também uma breve discussão das ideias de Thomas Kuhn e Karl Popper, dois dos mais importantes críticos da concepção de ciência empírico-indutivista.

Na unidade B, foi desenvolvido um conjunto de tópicos da história das ideias científicas que contemplou, em linhas gerais: a concepção de um elemento primordial entre os filósofos pré-socráticos; a física e a cosmologia aristotélicas; a física escolástica e a aproximação entre *episteme* e *techné*, combinada com a revalorização da cultura grega, durante o Renascimento.

A discussão desses conteúdos foi importante para que, dentro do espírito da proposta, os estudantes pudessem desenvolver a compreensão de que emergência da ciência moderna se processou no bojo de um amplo conjunto de transformações histórico-culturais, não sendo, portanto, redutível a uma interpretação histórica simplista de um empreendimento conduzido por “gênios iluminados, à frente de seu tempo”, à margem das influências e injunções do contexto sócio histórico. A empresa científica não se desenvolve à margem da história e a construção da ciência moderna foi conduzida por pensadores que procuraram responder às questões colocadas pelo seu tempo, inicialmente através de uma revalorização e diálogo crítico com os pensadores antigos e finalmente pela superação das formas de pensar e investigar a natureza legadas pela Antiguidade Clássica. Foi este o espírito que norteou a escolha dos textos implementados.

Além do conteúdo específico desenvolvido na fase preliminar, outro fator merece ser explicitado: o pesquisador foi o professor responsável pelo desenvolvimento da disciplina. Se por um lado esta situação facilitou a implementação da proposta, por outro dificultou isolar a sua avaliação da atuação docente do pesquisador no período que a antecedeu.

Essa fase foi uma espécie de etapa de mútuo reconhecimento educador-educando, de construção de um espaço de reflexão docente-discente favorável a uma abordagem dialógica e problematizadora. A ação do professor se pautou pela discussão de textos previamente lidos pelos estudantes, e apresentações dialogadas sobre aspectos complementares ao texto. Convém explicitar que foi mediante o trabalho realizado nesta fase que o professor pesquisador pôde identificar algumas das concepções prévias dos estudantes em relação à natureza da ciência, à história em geral e à história da ciência.

Ao final desta fase os estudantes realizaram uma avaliação escrita. Nesta, priorizou-se, que o aluno identificasse e comentasse as principais ideias científicas no âmbito da física e cosmologia aristotélica, as contribuições dos filósofos escolásticos, e a interação entre ciência e técnica durante o Renascimento. A interdependência entre a observação e a teoria esteve implicitamente articulada a essa questões.

É importante salientar que a fase preliminar foi extremamente relevante para o desenvolvimento da sequencia didática. Assim, a avaliação dos conteúdos desta fase foi importante para que os alunos tivessem clareza sobre os aspectos históricos e epistemológicos que seriam priorizados na sequencia didática. Como as questões seriam

apresentadas? Como estas deveriam ser respondidas? Como que eles deveriam ler e participar dos debates? Enfim, era preciso explicitar para o estudante que a disciplina e a sequência didática exigiriam dele um razoável esforço intelectual de leitura reflexiva dos textos.

A seguir apresenta-se, de forma sintética, a sequência dos tópicos discutidos nas duas unidades da fase preliminar e nas duas da sequência didática. Esses tópicos foram discutidos em encontros semanais de 2 horas-aula com os estudantes da disciplina.

O desenvolvimento da fase preliminar

1º Encontro: Apresentação da disciplina e do professor-pesquisador.

Unidade A

2º Encontro: O indutivismo.

Texto principal – O que é ciência afinal? (CHALMERS, 1993, cap. I, p.23-35).

3º Encontro: O problema da indução.

Texto principal - O que é ciência afinal? (CHALMERS, 1993, cap. II, p.36-45).

4º Encontro: A dependência que a observação tem da teoria.

Texto principal – (CHALMERS, 1993, cap. III, p.46-63).

5º Encontro: Das conjecturas aos paradigmas.

O Empirismo Lógico

As críticas ao Empirismo Lógico: Karl Popper e Thomas S. Kuhn.

Texto principal – A ciência como atividade humana (KNELLER, 1980, cap.3, p. 54-71).

Unidade B

6º Encontro: A física do movimento e a cosmologia na Antiguidade Clássica

Texto principal – Força e movimento: de Tales a Galileu (PEDUZZI, 2008a cap.1, p. 10-24).

7º Encontro: O sistema de Ptolomeu.

Texto principal – Força e movimento: de Tales a Galileu (PEDUZZI, 2008a cap.1, p. 23-30).

8º Encontro: A física aristotélica.

Texto principal – Força e movimento: de Tales a Galileu (PEDUZZI, 2008a, cap.2, p. 34-46).

9º Encontro: A física da força impressa e do impetus.

Críticas ao modelo de Ptolomeu ao longo da Idade Média.

Texto principal – Força e movimento: de Tales a Galileu (PEDUZZI, 2008a, cap.3, p. 48-69; cap.4, p70-74).

10º Encontro: O Renascimento – as transformações histórico-culturais.

Texto principal: Ciência na História (BERNAL, 1976; v. II cap. VII, p.367-402).

O desenvolvimento da sequência didática

Nos encontros que compuseram as duas unidades desta sequência, a perspectiva dialógica e problematizadora da ação didática foi orientada pela metodologia dos chamados, momentos pedagógicos (DELIZOICOV, ANGOTTI, PERNAMBUCO, 2002). Esta orientação metodológica já vinha sendo exercitada nos encontros anteriores, mas no desenvolvimento da sequência, passou a ser explorada de forma mais efetiva. Cabe salientar que os três momentos pedagógicos não se resumem a uma sequência rígida e estanque de etapas a serem desenvolvidas pelo professor. Esta abordagem metodológica exige do professor o desenvolvimento de uma escuta sensível, para que possa mapear os conhecimentos anteriores do estudante, no sentido de identificar suas limitações e resistência à apreensão de um novo conhecimento, empreendendo assim o que Delizoicov (1991), inspirando-se em Kuhn, chama de dialogicidade tradutora.

1ª Unidade - A revolução copernicana e a gênese da gravitação newtoniana

1º Encontro: Apresentação da proposta didática

- Apresentação da proposta e dos objetivos da pesquisa aos estudantes;

- Retomada e apresentação dialogada em data-show dos principais conceitos da física do movimento e da cosmologia vigentes na primeira metade do século XVI, assim como das mudanças histórico-culturais que estavam em curso;
- Entrega aos alunos dos textos: A invisibilidade dos pressupostos e das limitações da teoria copernicana nos livros didáticos de física - seções III e IV (MEDEIROS; MONTEIRO, 2002) e A premissa metafísica da revolução copernicana (SILVEIRA, 2002);
- Os alunos foram orientados a ler atentamente ambos os textos, anotar as suas dúvidas e formular questionamentos, que seriam discutidos no encontro seguinte. O mesmo procedimento foi adotado para a discussão dos textos seguintes.

2º Encontro: A teoria de Copérnico e a necessidade de uma nova física

Problematização inicial – A questão problematizadora do encontro foi a discussão dos problemas científicos, filosóficos e religiosos apresentados pela teoria de Copérnico, e por que esta teoria suscitava a construção de uma nova física.

Este momento iniciou-se pela discussão de algumas questões formuladas pelos estudantes. Ficou evidente que eles desconheciam qualquer referência à influência das ideias metafísicas sobre o trabalho de Copérnico. Alguns alunos fizeram perguntas cujas respostas estavam explícitas no próprio texto, sinalizando dificuldades na interação com o material. Mas algumas questões interessantes para discussão foram colocadas. Por exemplo: questionou-se a afirmação de que o pensamento copernicano resultou de novas interpretações dos fatos conhecidos e não de novas observações; a importância da hipótese de tirar a Terra do centro universo para o desenvolvimento de uma nova ciência; e se pressupostos de cunho metafísico poderiam ainda inspirar a pesquisa atual.

Organização do conhecimento

Neste momento o professor pesquisador procurou destacar os principais problemas de natureza científica, filosófica e religiosa apresentados pela teoria de Copérnico. Houve um estudante que

perguntou o que significava a expressão “uma nova física”? Esta questão suscitou uma rediscussão do contexto histórico, cultural e científico, que envolvia o conflito entre copernicanos e ptolomaicos.

Aplicação do Conhecimento

As principais questões que emergiram na problematização foram retomadas com os estudantes, principalmente os problemas científicos apresentados pelo universo copernicano. Como atividade extraclasse os alunos foram solicitados ainda a examinar os manuais de física básica, utilizados em sua formação, e identificar a presença (ou a ausência) de referências à necessidade de construção de uma nova física compatível com a teoria de Copérnico.

Antes de finalizar o encontro, o professor-pesquisador fez uma breve apresentação dos textos que seriam discutidos no próximo: Entrevista com Tycho Brahe (MEDEIROS, 2001) e Entrevista com Kepler – do seu nascimento à descoberta das duas primeiras leis (MEDEIROS, 2002), e deixou como leitura optativa o artigo: Tycho Brahe e Kepler na Escola: uma contribuição à inserção de dois artigos em sala de aula (PRAXEDES; PEDUZZI, 2009).

3º Encontro: Tycho Brahe e Kepler: a combinação do espírito de precisão com a criatividade teórica

Problematização Inicial - As principais questões apresentadas pelos estudantes foram: (a) quais os argumentos que Tycho Brahe levanta contra a teoria de Copérnico? (b) que concepção filosófica norteou os trabalhos de Kepler? (c) a generalização que Kepler empreendeu, a partir dos dados obtidos para Marte é um tipo de indutivismo? (d) A astronomia atual é regida por essa maneira de fazer ciência, a partir de generalizações? (e) Por que os livros didáticos não citam a construção dos instrumentos de Tycho Brahe? A estas questões, o professor pesquisador acrescentou outras: (f) O cosmo aristotélico “perfeito e imutável” tinha alguma implicação religiosa? (g) Este pressuposto, de algum modo, pode ter comprometido as observações dos astrônomos ocidentais? (h) O rigor de Tycho Brahe com a precisão dos dados observacionais e a valorização deste rigor pelos seus contemporâneos pode ser associado às grandes navegações transcontinentais que possibilitaram o incremento do comércio e a mudança de postura daqueles que se dedicavam à investigação da natureza?

Organização do Conhecimento

O pesquisador desenvolveu os pontos principais de ambos os artigos. As considerações epistemológicas contemporâneas subjacentes ao texto foram enfatizadas a partir de extratos do artigo: Tycho Brahe e Kepler na Escola: uma contribuição à inserção de dois artigos em sala de aula (PRAXEDES; PEDUZZI, 2009).

Aplicação do Conhecimento

Rediscussão das questões da problematização inicial;

Foi sugerida como leitura optativa, trechos da Carta de Tycho Brahe a Johannes Kepler em Graz (BRAHE, 2004). Nesta, Tycho critica o apego de Kepler as ideias metafísicas, afirmando que se atém aos dados observacionais. Todavia, em nenhum momento de seu texto Tycho critica o dogma da circularidade do movimento dos astros.

Como atividade extraclasse, foi sugerido que os estudantes examinassem nos manuais de física básica, utilizados em sua formação, a presença (ou a ausência) de referências às ideias de Kepler sobre a dinâmica do movimento planetário.

Finalizando o encontro, apresentou-se rapidamente o texto: Três Episódios de Descoberta Científica: da caricatura empirista a uma outra história (SILVEIRA, PEDUZZI, 2006), cujas seções I e II seriam discutidas no quarto encontro.

4º Encontro: Galileu Galilei – o início de uma nova mecânica e a observação de um novo céu

Problematização inicial – Para este encontro o professor-pesquisador propôs e enviou, via email, para os estudantes algumas questões problematizadoras relacionadas ao artigo que seria discutido, e outras relacionadas a Tycho Brahe e Kepler. Fazia-se necessário apresentar aos estudantes questões importantes que não foram propostas ou suficientemente exploradas nos encontros anteriores.

Convém assinalar que, na problematização inicial, cabe ao professor fazer perguntas ao estudante que, normalmente ele não se faria, como salienta Delizoicov (2001). Foram essas as questões apresentadas: (a) Você percebe alguma conexão entre a física desenvolvida por Galileu e a sua defesa da teoria de Copérnico? Procure justificar a sua resposta; (b) O fato de Galileu ser um copernicano, de alguma forma, pode ter colaborado para que ele observasse, pela

primeira vez na história, os satélites de Júpiter, as orelhas (anéis) e as manchas solares? (c) Essas observações corroboram a teoria de Copérnico? Abalam a crença na imutabilidade do cosmo aristotélico?

Um dos estudantes formulou uma questão bem crítica em relação ao Galileu, normalmente, apresentado nos livros textos: “Alguém se beneficiou, de alguma forma, ao omitir nos livros texto o perfil racionalista de Galileu, privilegiando o seu perfil empirista”?

Organização do conhecimento

O pesquisador abordou os pontos principais do texto.

Leitura de trechos do livro, A revolução copernicana (KUHN, 1990, p.253; 256-257) onde o autor tece algumas reflexões sobre as observações telescópicas de Galileu.

Aplicação do Conhecimento

Os alunos leram um trecho dos Diálogos sobre os dois Principais Sistemas do Mundo citado por Nussenzweig (2001, p. 67-68), em um capítulo sobre os princípios da dinâmica. Com base nesta fonte eles responderam à seguinte pergunta: Galileu chegou à lei da Inércia?

Em seguida, leram o mesmo trecho um pouco mais ampliado e citado por Dias, Santos e Souza (2004). Responderam então à mesma pergunta formulada anteriormente. Nesta segunda fonte os estudantes percebem que Galileu aproximou-se da lei da inércia, mas não a atingiu; concebendo efetivamente uma “inércia circular”. No primeiro texto, no entanto, eles são levados a aceitar a ideia de que a lei da inércia, em sua forma retilínea, foi concebida por Galileu.

Com este exercício procurou-se evidenciar para os alunos alguns dos cuidados que se deve ter ao abordar a história da ciência em sala de aula, ou em materiais didáticos. Avalia-se aqui que o recorte realizado por Nussenzweig teve a intencionalidade didática de não confundir o aluno, um procedimento muito comum no processo de transposição didática do saber científico para o saber a ensinar, conforme foi salientado nos capítulos 2 e 3. Todavia, o pesquisador não concorda com o procedimento do autor.

Em seguida apresentou-se sumariamente o texto para leitura e discussão no 6º encontro: René Descartes, extraído do capítulo 4, da presente pesquisa.

5º Encontro - Exibição seguida de discussão do documentário, Galileu – a batalha pelo céu

Neste encontro, optou-se por explorar com os estudantes outro recurso didático além da discussão dos textos e exposição dialogada em data-show dos aspectos principais do processo de construção de uma nova física. Digno de nota é que a preocupação em utilizar diferentes recursos e procedimentos didáticos pode ser ancorada, por exemplo, nos estudos que defendem a necessidade de um pluralismo metodológico no ensino de ciência (LABURÚ; ARRUDA; NARDI, 2003).

Dessa forma, exibiu-se em sala de aula o documentário em DVD: Galileu – A batalha pelo céu (SCIENTIFIC AMERICAN – Brasil; NOVA PBS). O documentário aborda aspectos da vida de Galileu e do contexto histórico-cultural de sua época que foram apenas sinalizados, ou não contemplados nos textos utilizados. É dado relevo à dimensão humana do cientista, ao se apresentar os conflitos pessoais e espirituais por ele enfrentado ao defender abertamente a Teoria de Copérnico e utilizá-la na interpretação de suas observações telescópicas.

O documentário transmite com clareza a mensagem de que ciência praticada pelos copernicanos não era descontextualizada e socialmente neutra. A teoria copernicana não era apenas um conhecimento científico, sem qualquer relação com as transformações culturais e sócio-históricas que estavam em curso.

Após a exibição do documentário foi realizado um debate, explorando a influência da teoria copernicana sobre os trabalhos de Galileu e suas implicações no contexto religioso político e ideológico da época.

6º Encontro: René Descartes

Problematização inicial – Dentre as questões problematizadoras apresentadas pelos estudantes, destacaram-se: (a) Descartes acreditava na existência de um ser divino, ou ele apenas se protegia da inquisição imposta pela Igreja? (b) Newton só teria aprimorado as duas primeiras leis da natureza de Descartes para formular a sua primeira lei? (c) De acordo com alguns textos estudados anteriormente notamos, que não havia um rompimento total de uma nova filosofia em relação à antiga. Neste sentido, no texto de Descartes, de que forma seria o rompimento definitivo com as forma arcaicas de pensamento representadas pela filosofia aristotélico-escolástica?

O professor pesquisador apresentou aos estudantes à seguinte questão: além da explicação aristotélica para a gravidade, que outras explicações eram correntes entre os filósofos naturais, na primeira metade do século XVII?

Organização do conhecimento

Os aspectos mais significativos do texto foram enfatizados pelo pesquisador, em especial o princípio de conservação da quantidade de movimento, o princípio de inércia em sua forma retilínea e a ideia de um universo completamente preenchido pela matéria.

Aplicação do conhecimento

O pesquisador discutiu algumas das questões da problematização inicial.

Os estudantes discutiram a não distinção na física cartesiana entre a matéria do espaço celeste e a matéria da Terra.

Os estudantes discutiram as diferenças entre o conceito de quantidade de movimento em Descartes e o mesmo conceito na mecânica newtoniana.

Para o encontro seguinte foram indicados os textos, “Sobre Isaac Newton” (PEDUZZI, 2008b) e “Isaac Newton e a gravitação universal”, que foi extraído desta pesquisa e adaptado para discussão no 7º encontro. O primeiro texto foi sugerido como leitura complementar, pois aborda aspectos da atividade intelectual de Newton que não foram contemplados no segundo.

7º Encontro Isaac Newton e a gravitação universal

Problematização inicial – Este momento foi norteado pelas seguintes questões problematizadoras: (a) Que tipo de objeção os filósofos cartesianos faziam à ideia de atração à distância entre os corpos celestes, suscitada pela gravitação newtoniana? (b) Que relação pode ser estabelecida entre o movimento orbital de um planeta e um movimento inercial? (c) Há alguma conexão entre um corpo que executa um movimento inercial e a lei das áreas de Kepler?

Organização do conhecimento

Sistematização dos pontos principais do texto.

Apresentação sintética da demonstração do caráter dinâmico da lei das áreas feitas por Newton nos Principia (NEWTON, 2002a, p. 83-87).

Aplicação do conhecimento

Rediscussão das questões da problematização inicial;

8º Encontro – Retomada e exposição dialogada dos pontos principais abordados na gravitação newtoniana e na sequencia didática. Discussão sobre a influência da mecânica e gravitação newtoniana sobre as sucessivas gerações de físicos dos séculos XVIII e XIX.

2ª Unidade - A gravitação einsteiniana

No delineamento e implementação da unidade 1 a metodologia adotada privilegiou a discussão de textos elaborados por pesquisadores que vêm articulando as reflexões da história e filosofia da ciência ao ensino de ciência, e alguns textos do professor-pesquisador. A escolha desses textos foi norteada pela reflexão histórica e epistemológica desenvolvida neste trabalho.

Na unidade 2 optou-se por uma abordagem e uma linha de procedimentos relativamente distinta daquela desenvolvida na unidade anterior, mas em sintonia com os principais objetivos do trabalho de intervenção. Ao longo de sua reflexão sobre revolução e a gravitação newtoniana, o pesquisador considerou que era necessário discutir com os estudantes as linhas gerais do desenvolvimento de uma nova gravitação - a einsteiniana.

Nesta perspectiva, elaborou-se um roteiro básico das principais questões que poderiam ser discutidas com os estudantes. Para a definição do roteiro considerou-se o tempo didático disponível e o fato de o Curso não contemplar, em nenhuma de suas disciplinas, uma introdução à relatividade geral, sendo então priorizados os seguintes tópicos:

1. A luz: incompatibilidade entre a mecânica clássica e o eletromagnetismo;
2. O princípio da relatividade restrita;
3. O espaço-tempo;
4. O conflito entre a relatividade restrita e a gravitação newtoniana;
5. O princípio de equivalência;
6. A relatividade geral - uma nova gravitação;

7. O conflito entre relatividade geral e a mecânica quântica e as tentativas de unificação;
8. O gráviton e o modelo padrão;

Para a discussão desses tópicos foram selecionados e disponibilizados para os estudantes os textos:

1. Três episódios de descoberta científica: da caricatura empirista a uma outra história (SILVEIRA; PEDUZZI, 2006). Nas seções III. 1 e III. 2 desse texto os autores criticam os relato empiristas que atribuem a origem da teoria da Relatividade Especial ao Experimento de Michelson-Morley. E apresentam a seguir uma narrativa em sintonia com as reflexões contemporâneas da história da ciência.
2. Réguas e Relógios (BEN-DOV, 1996, p. 106-118) - O autor aborda a emergência da teoria eletromagnética de Maxwell na segunda metade do século XIX, o seu conflito com a mecânica newtoniana, a ideia do éter e as tentativas frustradas de detectá-lo. As diferentes abordagens de Lorentz e Einstein para a dilatação do tempo e a contração do comprimento, e os desdobramentos do enfoque einsteiniano também são discutidos pelo autor. Como o anterior, este também fornece elementos para uma crítica à concepção empírico-indutivista.
3. O Universo Elegante (GREEN, 2001, p.70-103). Trata-se de um texto de divulgação científica, escrito pelo físico e escritor contemporâneo Brian Green. O autor faz uma boa exposição das principais mudanças nos conceitos de espaço e tempo, promovidas com a formulação da teoria da relatividade especial. Discute o conflito desta teoria com a, bem estabelecida, gravitação newtoniana e as transformações conceituais que levaram Einstein à formulação de uma nova gravitação. Apesar de seus méritos na abordagem dos conceitos, o autor incorre em algumas simplificações sobre a história da ciência. Aspecto que foi discutido com os estudantes e representou uma boa oportunidade deles exercitarem algumas das reflexões históricas e epistemológicas desenvolvidas nos dois primeiros encontros e, principalmente, ao longo da primeira unidade didática.
4. Sobre a relatividade geral (PEDUZZI, 2008c, p.174-196). Este texto foi recomendado aos estudantes como uma leitura

complementar ao texto anterior, principalmente no que se refere às questões de cunho histórico e epistemológico.

5. *Ciência e Subjetividade: o Caso Einstein* (THILLIER, 1994, p. 225-247). Este texto foi sugerido como leitura optativa aos estudantes. Nele o autor enfatiza a ideia de que os conceitos não derivam diretamente da experiência, e que componentes de caráter subjetivo, podem estar associados à produção científica.
6. *A física dos quarks e a epistemologia* (MOREIRA 2007). O autor apresenta conceitualmente a física dos quarks e faz uma reflexão sobre a física de partículas à luz de algumas questões epistemológicas contemporâneas. É abordado ainda o modelo padrão de partículas elementares e a hipotética partícula do gráviton.

Foram disponibilizados também os seguintes documentários em DVD.

1. *Einstein: muito além da relatividade* (SCIENTIFIC AMERICAN – Brasil; NOVA PBS). O documentário enfatiza bem o papel do eletromagnetismo na evolução das ideias de Einstein; aborda a sua interação com outros cientistas da época, em especial as contribuições de Hermann Minkovsky e Marcel Grossman para o seu trabalho. Em vários aspectos, a sua narrativa humaniza a figura de Einstein contextualizando historicamente a sua produção científica e o seu grande esforço intelectual. Todavia, algumas cenas podem suscitar nos estudantes uma interpretação do cientista como um ser à margem da história. De qualquer modo, o filme é um convite e um desafio ao estudante, no sentido de articular as reflexões tecidas em aula a um diálogo crítico com esses meios de divulgação científica.
2. *Fronteiras da Física – o universo elegante, v.1* (SCIENTIFIC AMERICAN – Brasil; NOVA PBS). O documentário é muito instigante e elucidativo na abordagem dos conceitos. Todavia, requer alguns cuidados, pois em alguns trechos simplifica e até deforma alguns episódios da história da ciência. Isto suscita uma discussão sobre a importância da história e filosofia da ciência no uso crítico de materiais como este em sala de aula.

A seguir apresenta-se uma discussão sucinta dos encontros realizados na segunda fase da intervenção didática

1º Encontro - Einstein e o conflito entre a mecânica newtoniana e o eletromagnetismo.

Neste primeiro encontro empreendeu-se uma retomada dos distintos conceitos de gravidade em Aristóteles, Descartes e Newton, seguida por uma descrição sintética da nova unidade didática que contemplaria as linhas gerais do desenvolvimento de um novo conceito de gravidade na relatividade geral de Einstein.

A seguir, foram exibidos os três primeiros capítulos da parte 1 do documentário, Einstein – Muito Além da Relatividade. Após a exibição, empreendeu-se uma discussão sobre o documentário. Nessa discussão, os estudantes se detiveram em comentar a formação científica e cultural de Einstein, assim como os aspectos humanos do cientista. O professor-pesquisador chamou a atenção dos alunos para o conflito entre a mecânica clássica e o eletromagnetismo em relação à velocidade da luz, a ideia do éter, e as tentativas frustradas de detectá-los.

A exibição, seguida pela discussão, do documentário motivou os alunos e propiciou a emergência de algumas questões relativas ao processo de construção da relatividade especial, tópico contemplado no texto que seria discutido no encontro seguinte: Três episódios descoberta científica: da caricatura empirista a uma outra história (SILVEIRA, PEDUZZI, 2002, seções III.1 e III.2).

Avalia-se aqui que a exibição e a discussão dos episódios do documentário potencializou, de forma diferenciada para cada estudante, o exercício dos três momentos pedagógicos.

Os documentários usados nesta unidade foram estimulantes para, uma organização dos conhecimentos da unidade anterior, a problematização do novo conhecimento, e aplicação ou articulação dos conhecimentos histórico-epistemológicos desenvolvidos nas aulas à reflexão crítica e à compreensão dos conteúdos contemplados nesses recursos didáticos.

Na interação com os documentários os estudantes puderam identificar, nas cenas apresentadas, enfoques e declarações em sintonia com as discussões em aulas e outras que simplificavam e distorciam os aspectos históricos e epistemológicos priorizados no trabalho de intervenção.

2º Encontro – O conflito entre a mecânica e o eletromagnetismo – a teoria da relatividade restrita de Einstein

Problematização inicial – A discussão foi norteadada por um pequeno número de questões problematizadoras, surgidas durante o encontro ou propostas a priori pelo professor pesquisador, tais como: (a) Michelson e Morley provaram a não existência do éter? (b) Os experimentos de Michelson e Morley foram a principal motivação para o desenvolvimento da relatividade especial de Einstein? (c) a construção da teoria da relatividade restrita coloca em xeque a concepção empírico-indutivista?

Convém assinalar que, apesar dos estudantes terem demonstrado interesse e curiosidade pelo tema, ficou claro na discussão que, de forma geral, eles não possuíam certa familiaridade com os conceitos físicos que estavam se abordados. Os estudantes tiveram na disciplina Física Moderna I, uma introdução à relatividade especial, todavia, há muito não eram solicitados a refletir sobre o assunto.

A percepção dessa dificuldade alertou o professor-pesquisador para a necessidade de, ao longo dos encontros, dedicar uma atenção especial à discussão dos conceitos físicos.

Organização do conhecimento

O professor-pesquisador apresentou uma simulação do experimento de Michelson-Morley e apresentou em data-show os aspectos principais do texto, privilegiando a crítica ao empirismo, feita pelos seus autores.

Aplicação do conhecimento – O professor exibiu e depois discutiu com os estudantes o episódio 1, capítulos 4 e 5, do documentário: Einstein – Muito Além da Relatividade. Os alunos foram orientados, a articular as reflexões tecidas no texto, ao diálogo com narrativa que o documentário faz acerca da relatividade dos conceitos de tempo e espaço, e o princípio de constância da velocidade da luz, proposto por Einstein.

Como atividade extraclasse, sugeriu-se que os estudantes assistissem em casa as principais cenas dos episódios discutidos em aula.

Para o encontro seguinte foi indicado o artigo, Régua e Relógios (BEN-DOV, 1996, p. 106-118).

3º Encontro – Réguas e Relógios

Problematização inicial e organização do conhecimento

Nesse texto os estudantes demonstraram uma acentuada dificuldade de compreensão dos aspectos conceituais abordados pelo autor. Por exemplo, a interpretação conferida por Lorentz à não detecção do éter nos experimentos de Michelson e Morley e o de as chamadas, transformações de Lorentz terem sido obtidas, de forma independente, por Lorentz e Einstein, a partir de perspectivas distintas sobre a velocidade da luz.

As questões levantadas pelos estudantes foram pontuais, relacionadas a não compreensão de passagens do texto. Dessa forma, os momentos de Problematização inicial e Organização do conhecimento estiveram intimamente entrelaçados durante todo o encontro.

Aplicação do conhecimento

Como possível aplicação do conhecimento e, ao mesmo tempo questão problematizadora para o próximo encontro, sugeriu-se aos estudantes que refletissem sobre as possíveis implicações que a assunção da velocidade da luz como máxima velocidade de transmissão de uma informação poderia ter sobre a gravitação newtoniana. Esta questão permeou os encontros seguintes, estimulando a aplicação, ou a articulação, dos conhecimentos adquiridos nos dois primeiros encontros, à reflexão problematizadora e à organização dos conhecimentos que seriam discutidos nos demais.

Nos três encontros seguintes foram discutidos tópicos do capítulo 3 do livro, O Universo elegante (GREEN, 2001, p. 70-103); também foram exibidos e discutidos em aula, alguns episódios dos documentários em DVD, Fronteiras da Física: o universo elegante, e Einstein: Muito Além da Relatividade, 2ª parte.

Como leitura auxiliar, recomendou-se o texto, Sobre a relatividade geral (PEDUZZI, 2008c, p.174-196).

Um comentário preliminar à interação desenvolvida a partir do 4º Encontro

Inicialmente convém esclarecer que muitos dos conceitos físicos abordados no texto de Green, acima assinalado, não haviam sido estudados pelos estudantes, pois, conforme já salientado, não houve nas disciplinas científicas do Curso uma iniciação à teoria da relatividade geral. Dessa forma, neste e nos encontros subsequentes a problematização efetuada pelos estudantes, foi, em várias ocasiões, incipiente e de caráter predominantemente conceitual.

Na organização do conhecimento, houve uma preocupação especial do professor-pesquisador em clarificar o significado dos conceitos e chamar a atenção dos estudantes para os aspectos históricos e epistemológicos presentes no texto e nos documentários utilizados. Neste processo o professor fez exposições dialogadas dos principais conceitos abordados, discutiu algumas das cenas dos documentários, além de frisar passagens importantes do texto.

Nos momentos reservados à aplicação do conhecimento, nem sempre efetuados em um mesmo encontro, os estudantes eram estimulados a dialogar acerca dos diferentes significados que noções e conceitos clássicos como, tempo, espaço, gravidade e ação à distância, adquiriam nas abordagens newtonianas e einsteinianas; assim como, a identificar nos documentários e no texto principal possíveis deformações e simplificações da história da ciência, além da mistificação dos cientistas.

Ao contrário da primeira unidade, em que os textos utilizados estavam em sintonia com a reflexão histórico-epistemológica desenvolvida pelo pesquisador, ao longo do 4º, 5º e 6º encontros, foram utilizados recursos didáticos (texto e documentários), que apresentavam virtudes do ponto de vista de abordagem estritamente conceitual, mas que, em certos momentos, deixavam a desejar no que diz respeito à reprodução de imagens inadequadas da ciência e sua construção histórica.

A opção do professor-pesquisador pelo uso desses recursos didáticos, de certo modo, conferiu às interações em sala de aula uma dinâmica que tornou tênue uma delimitação entre os três momentos pedagógicos.

Dessa forma, os próximos encontros serão sumariamente descritos.

4º Encontro – A visão newtoniana da gravidade e a sua incompatibilidade com a relatividade especial

Discussão do texto principal (GREEN, 2001, p. 71-80).

Exibição seguida de debate dos episódios: O segredo constrangedor de Newton (Capítulos 2 Parte 1 documentário, Fronteiras da Física: O Universo Elegante) e Uma nova de gravidade (Capítulos 3 Parte 1, do mesmo documentário).

Sugeriu-se aos estudantes que assistissem em casa a 2ª parte do documentário Einstein: Muito Além da Relatividade.

5º Encontro – A aceleração e a curvatura do espaço tempo

Retomadas dos principais aspectos discutidos no encontro anterior.

Discussão do texto principal (GREEN, 2001, p. 80-93).

Apresentação seguida por discussão do documentário: Einstein: Muito Além da Relatividade (Parte 2, capítulos 1, 2).

6º Encontro - A resolução do conflito entre a relatividade especial e a gravitação newtoniana

Retomada dos principais aspectos discutidos no encontro anterior.

Discussão do texto principal (GREEN, 2001, p. 90-103).

Apresentação seguida por discussão do documentário: Einstein: Muito Além da Relatividade (Parte 2, capítulos, e 3 e 4).

Para o encontro apresentou, brevemente, artigo, A física dos quarks e a epistemologia (MOREIRA 2007).

7º Encontro - A física dos quarks, o modelo padrão e o gráviton.

Discussão do artigo

Exibição e discussão do Capítulo 4 (O Modelo Padrão), Parte 1, do documentário: O Universo Elegante.

8º Encontro – Retomada e exposição dialogada dos pontos principais abordados na 2ª unidade da sequência didática.

7 SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS E ANÁLISE DA INTERVENÇÃO DIDÁTICA

Neste capítulo pretende-se analisar as possíveis contribuições do trabalho de intervenção didática no sentido de propiciar ao estudante subsídios para uma compreensão mais adequada da ciência e da construção histórica de seus conceitos e teorias.

A análise foi desenvolvida para cada uma das fases da intervenção correspondente às duas unidades que compunham a sequência didática implementada. Os instrumentos utilizados para a coleta de dados ao final de cada fase da intervenção foram um questionário e um conjunto de entrevistas semiestruturadas.

7.1 ANÁLISE DA INTERVENÇÃO DIDÁTICA EM SUA PRIMEIRA FASE

Após o término da primeira unidade didática os estudantes responderam a um questionário. Através da análise das respostas dos alunos, o pesquisador procurou avaliar se a implementação da ação didático-pedagógica contribuiu para que os estudantes desenvolvessem uma visão mais adequada da natureza da ciência e do processo histórico de construção das teorias e conceitos científicos abordados na intervenção e, além disso, iniciassem a prática de articular essa visão à sua reflexão sobre o ensino de física.

Assim, em conformidade com os objetivos centrais estabelecidos para a intervenção, as questões propostas e as respectivas respostas dos estudantes foram agrupadas em quatro categorias de análise:

C1 – A interdependência entre observação e teoria, ou entre experimento e teoria;

C2 – A historicidade da ciência – Esta categoria diz respeito às múltiplas dimensões da ciência (intrínseca, filosófica, cultural e histórica) e, portanto, a interação entre a ciência e o contexto sócio-histórico, na qual se insere a influência recíproca entre ciência e tecnologia.

C3 – O caráter provisório, mutável e inventivo do conhecimento científico – as teorias, leis e conceitos científicos como produções do intelecto humano, balizadas pelo diálogo crítico e criativo com a natureza.

C4 – Contribuições da intervenção didática para a reflexão do aluno sobre o potencial educativo da história e filosofia da ciência no ensino de física.

É importante salientar que essas categorias não devem ser compreendidas como componentes isoladas, mas como recurso analítico para apreender a complexidade da situação que é objeto desta investigação. Atesta isto o fato de algumas das questões propostas poderem se enquadrar em mais de uma categoria. Portanto, o que se busca aqui com esta análise é evidenciar os aspectos mais relevantes da dinâmica da atividade científica, apreendidos pelos estudantes em decorrência da intervenção didática.

Comentário preliminar sobre o questionário

O questionário apresentado abaixo fez parte de uma das avaliações formais da disciplina e foi respondido pelos estudantes sem qualquer fonte de consulta. Esta opção, de certo modo, fez com que os alunos encarassem com mais seriedade o trabalho de leitura e discussão dos textos em sala de aula. Pois, apesar da boa receptividade à discussão dos temas históricos e epistemológicos, e de um bom relacionamento com o professor-pesquisador, os alunos estavam bem adaptados às aulas expositivas, centradas no monólogo do professor.

Uma possível crítica a esta forma de aplicação do questionário seria a de que os alunos, pelo fato de estarem sendo avaliados, tenderiam a responder o que o professor gostaria, ou seja, as respostas poderiam ser forçadas. O professor-pesquisador esteve atento a este risco e procurou minimizá-lo, propondo questões que obrigassem o aluno a refletir e externar o seu posicionamento à luz dos conhecimentos históricos e epistemológicos debatidos em aula. Nesta tarefa, o professor-pesquisador não se furtou em propor questões que, algumas vezes, colidiam frontalmente com algumas noções histórico-epistemológicas, explícita ou implicitamente, assimiladas pelo estudante nas disciplinas científicas, assim como outras que, lidas acriticamente, poderiam induzi-lo a recorrer àquelas noções, respondendo assim, não o que o professor gostaria, mas sim, conforme a interpretação conferida por ele à questão.

Dessa forma, o questionário aplicado teve uma dupla finalidade: (i) avaliar os estudantes do ponto de vista institucional e disciplinar; (ii) avaliar as possíveis contribuições da intervenção didática para que os estudantes desenvolvessem uma melhor compreensão dos aspectos históricos, epistemológicos e pedagógicos contemplados nas categorias de análise acima assinaladas. A segunda finalidade do questionário indica que a sua validade se configura como, validade de conteúdo.

A validade de conteúdo segundo Gressler (2004, p.196) é “a indicação da representatividade de um comportamento ou de tópicos de um conhecimento a serem medidos em um instrumento”, divide-se em dois aspectos: validade de apresentação e validade de amostragem. A primeira refere-se ao aspecto externo do teste, pois, este deve ter uma boa apresentação. A validade de amostragem indica se o instrumento se baseia em uma amostra adequada de um universo de itens - no caso do presente trabalho, os tópicos abordados na unidade didática.

Para efeito de validação, o questionário foi previamente submetido à apreciação crítica de um grupo de cinco sujeitos. Dentre estes, um era estudante do curso e já havia cursado a disciplina, dois eram recém-formados pelo curso, e dois eram Licenciados em Física pela UFSC e cursavam o Mestrado em Educação Científica e Tecnológica dessa instituição.

Em linhas gerais, os licenciados e o licenciando assinalaram eventuais erros de digitação e sugestões no sentido conferir maior clareza as questões; foram observadas também a representatividade das questões propostas em relação aos tópicos abordados na unidade didática e a sintonia entre as questões e as categorias de análise que pretendiam contemplar. Estas sugestões não modificaram a essência do conteúdo das questões originais, mas permitiram ao pesquisador refinar a versão inicial do questionário, conferindo a este uma maior clareza e validade.

O questionário aplicado

As questões propostas foram respondidas por todos os alunos da turma. O grupo foi composto por sete alunos que estão aqui designados por: **Aluno 1, Aluno 2, Aluno 3, Aluno 4, Aluno 5, Aluno 6 e Aluno 7**, ou pela forma abreviada: **A1, A2, A3**, etc. O questionário aplicado é apresentado a seguir.

Evolução dos Conceitos de Física

4º ano matutino

Nome:

Data: _____ **Matrícula** _____

Orientação geral

Leia atentamente as questões abaixo. Ao responder a cada uma das questões procure justificar a sua resposta, apresentando sempre que possível um exemplo que ilustre a sua argumentação.

Questão 1

“Não foram tanto as observações e experimentos de Galileu que causaram a ruptura com a tradição, mas sua *atitude* em relação a eles. Para ele, os dados eram tratados como dados, e não relacionados a alguma ideia pré-concebida.... Os dados da observação poderiam ou não se adequar a um esquema conhecido do universo, mas a coisa mais importante, na opinião de Galileu, era aceitar os dados e construir a teoria para adequar-se a eles” .

- a) Galileu, efetivamente, realizou as suas observações telescópicas e tratou os dados delas advindos, com a atitude assinalada na citação acima? Justifique a sua resposta.
- b) Galileu ao elaborar a sua mecânica é guiado única e exclusivamente pelos dados experimentais? Justifique a sua resposta.

Questão 2

“Eu quando ensino Física sei, muito bem, que ela é uma ciência experimental. Que as leis que ensinamos saem todas da observação, sem preconceitos teóricos”.

- a) Como podemos nomear a posição epistemológica implícita na citação acima? Qual o seu posicionamento em relação a ela? Comente.
- b) A posição epistemológica implícita na citação acima propicia ao estudante uma compreensão mais rica das transformações científicas que ocorreram na astronomia e na física do movimento no período histórico situado entre Copérnico e Newton? Ela permite refletir sobre os erros, os avanços e recuos dos cientistas no processo de construção do conhecimento? Justifique o seu posicionamento.

Questão 3.

Na Bíblia, mais especificamente em Josué 10:12, 13, encontramos uma passagem na qual o profeta Josué ordena ao Sol e à Lua que parem. Esta passagem foi usada por Lutero em sua crítica à teoria de Copérnico. Cerca de cem anos depois, este episódio bíblico foi invocado por membros do alto clero da Igreja Católica no processo contra Galileu Galilei. Todavia, a Igreja possuía um competente corpo de astrônomos matemáticos que, desde os tempos de Copérnico, vinha estudando profundamente a teoria copernicana e a utilizando como instrumento de

cálculo. Dessa forma, havia um enfoque dessa teoria ao qual a Igreja não se opunha.

- a) Qual a diferença essencial entre a postura de Galileu e a posição da Igreja? Comente.
- b) Esta diferença de enfoque poderia ter implicações no contexto religioso, político e ideológico? Justifique a sua resposta e a ilustre com um possível exemplo.

Questão 4. Além dos problemas de natureza filosófica e religiosa, a teoria de Copérnico apresentava problemas de natureza científica que comprometiam a sua aceitação.

- a) Que problemas eram esses?
- b) Esses problemas, de natureza científica, tiveram alguma importância para as gerações de físicos e astrônomos posteriores a Copérnico? Justifique.
- c) Discuta se há relevância na compreensão desses problemas para o ensino-aprendizagem da mecânica e gravitação newtoniana.

Questão 5. Tradicionalmente no ensino de física as teorias e conceitos científicos são apresentados de forma desvinculada de seu contexto histórico-cultural. As dificuldades enfrentadas pelos cientistas no complexo processo de produção do conhecimento científico são desconsideradas. Em sua opinião uma abordagem da física que promova uma contextualização histórica e cultural das teorias e conceitos científicos pode ser útil ao estudante em seu processo de apreensão do conhecimento físico? Justifique o seu posicionamento.

Questão 6.

“Em 1665, Isaac Newton, então com 23 anos, deu uma contribuição básica à Física mostrando que a força que mantém a Lua na sua órbita é a mesma que faz uma maçã cair ...Newton concluiu que não somente a Terra atrai a maçã e também a Lua, mas que qualquer corpo no universo atrai todos os outros”.

Discuta o conteúdo da citação acima, tendo como referência os estudos realizados na disciplina Evolução dos Conceitos Física, em especial àqueles referentes à evolução das concepções teóricas de Newton.

Questão 7. Tendo como referência os estudos realizados na disciplina pode-se afirmar que Galileu e Newton apresentaram diferentes formulações para o princípio da inércia? Justifique a sua resposta.

Questão 8. Tycho Brahe, Galileu e Newton são pensadores que, em suas investigações da natureza, primam pela busca de precisão e rigor em suas medidas e observações. Essa atitude os leva a desenvolver engenhosos instrumentos de observação e experimentos. A atitude desses pensadores é isolada, ou pode ser associada às inovações ligadas à esfera da produção material, intelectual e artística? Comente a sua resposta, ilustrando-a com um exemplo.

7.1.1 Análise do desempenho dos alunos no primeiro questionário

Inicialmente, o foco da análise se atém ao desenvolvimento individual dos alunos em cada uma das categorias. Na sequência, levantam-se algumas inferências de caráter mais geral sobre o alcance da intervenção didática.

Categoria 1 – A interdependência entre observação e teoria, ou entre experimento e teoria

Na Categoria 1 foram colocadas as **Questões: 1a, 1b e 2a**. Nesta e nas demais categorias as respostas foram analisadas levando-se em conta os seguintes aspectos: posicionamento crítico, clareza e organização lógica das ideias e coerência nos argumentos utilizados. Dentro desses critérios conferiu-se a cada resposta um dos seguintes níveis qualitativos: Muito Bom, Bom, Regular e Insuficiente. Este último nível só foi atribuído quando a resposta do aluno não forneceu nenhum indício de reflexão crítica ou compreensão da questão proposta; o nível Regular foi aplicado quando a resposta do estudante, mesmo incompleta e até genérica, permitiu a identificação de indícios de reflexão crítica ou compreensão da questão; e os dois primeiros níveis foram utilizados quando a argumentação do estudante forneceu evidências de reflexão crítica e compreensão da questão.

No quadro 1, sintetizou-se os resultados alcançados pelo alunos na Categoria 1. Uma análise preliminar desse quadro indica que o desempenho da turma na categoria foi bom. De fato, dos 7 alunos participantes, 2 obtiveram o nível de desempenho Muito Bom (**A7** e **A4**), 2 alunos alcançaram o nível Bom (**A1** e **A2**) e 2 tiveram um

desempenho Regular (**A5** e **A6**); apenas 1 aluno teve um desempenho considerado como Insuficiente (**A3**).

Esses primeiros indicadores, no entanto, não traduzem a dificuldade que alguns alunos encontraram para compreender e assimilar as críticas à concepção empírico-indutivista apresentadas e discutidas em sala de aula no decorrer da intervenção didática.

Uma análise mais detalhada das respostas de cada aluno é apresentada após o quadro 1. Esta análise fornece uma visão mais aguçada do “aluno real”, de algumas das dificuldades que ele precisa enfrentar no sentido de reconhecer, problematizar, minimizar e, até, superar as suas concepções prévias, de forma a, efetivamente, se apropriar dos conhecimentos históricos e epistemológicos veiculados na disciplina.

Quadro 1 – Resultados obtidos na Categoria 1(Interdependência entre teoria e observação e entre teoria e experimento)

Aluno	Questão 1a	Questão 1b	Questão 2a	Desempenho na Categoria
A1	Regular	Bom	Bom	Bom
A2	Regular	Bom	Bom	Bom
A3	Insuficiente	Insuficiente	Muito Bom	Insuficiente
A4	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Muito Bom
A5	Regular	Insuficiente	Muito Bom	Regular
A6	Regular	Regular	Regular	Regular
A7	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Aluno 1

Questão 1a – A resposta de **A1** revelou-se, de certo modo, contraditória. Inicialmente o estudante declarou concordar com conteúdo da citação. Ele tentou justificar o seu “Sim” com o argumento de que, “*Galileu ao fazer as suas observações procurou não ficar preso ao modelo de mundo de épocas anteriores*”. Todavia, na continuidade

de sua argumentação sinalizou a importância dos pressupostos teóricos nas observações de Galileu, ao afirmar, “*assim buscou uma maneira de explicar teoricamente as suas observações mesmo frente à Igreja*”.

Sim. Galileu ao fazer as suas observações procurou não ficar preso ao modelo de mundo de épocas anteriores, assim buscou uma maneira de explicar teoricamente as suas observações mesmo frente à Igreja.

A justificativa do aluno sinaliza certo nível de reflexão crítica, e sugere que a sua concepção prévia de natureza empirista ingênua está sendo por ele questionada. Em função disso a sua resposta foi classificada como sendo de nível Regular.

Nível da reflexão crítica: Regular.

Questão 1b – O estudante foi sucinto em sua resposta, mas assinalou a importância dos pressupostos teóricos nos experimentos de Galileu.

Não. A carga teórica que já vinha sendo formulada estava contida em seus dados experimentais.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Questão 2a – **A1** identificou corretamente a posição epistemológica implícita na citação, além de expor a sua discordância em relação a este posicionamento.

Na citação pode-se observar uma posição do indutivismo ingênuo. Nem sempre as leis podem sair totalmente das observações, é impossível que um conhecimento seja livre de carga teórica.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Comparando-se as três questões respondidas por **A1**, pode-se perceber que em **1b** e **2a** ele explicitou com clareza ter desenvolvido uma reflexão crítica e ter, até certo ponto, compreendido o preceito epistemológico contemporâneo “toda observação é carregada de teoria” (KUNH, 1996; POPPER, 1975, BACHELARD, 1996, LAKATOS, 1979). Todavia, na **Questão 1a** ele não evidenciou de forma clara a sua compreensão.

É importante assinalar que se fosse apresentada ao aluno apenas a **Questão 1a** a sua resposta poderia conduzir o pesquisador à conclusão de que o aluno não desenvolveu uma boa reflexão e compreensão da posição epistemológica em tela. Por outro lado, se fossem propostas somente as **Questões 1b** e **2a** as respostas conduziriam o pesquisador a uma conclusão oposta à anterior. Isto, sem dúvida, mascararia os conflitos e ambiguidades do aluno em relação à apreensão de um preceito epistemológico contemporâneo radicalmente oposto ao que ele vem assimilando ao longo de sua formação. Neste sentido, se poderia afirmar, em sintonia com Bachelard (1996), que as concepções prévias do estudante se constituem em um obstáculo pedagógico a uma plena compreensão do novo preceito epistemológico que vem sendo apresentado no trabalho de intervenção didática.

Outro aspecto interessante que cabe ressaltar, é que a citação da **Questão 2** foi retirada de Medeiros (2001), onde, em uma entrevista fictícia com o astrônomo Tycho Brahe, um dos personagens expõe um posicionamento epistemológico muito comum entre estudantes e professores de física, mesmo em nível universitário (Gil et al, 2001). A citação é curta e incisiva, evidenciando para os alunos da disciplina, quase que explicitamente, uma posição indutivista. Em contrapartida a citação pertinente a **Questão 1** aparece em Chalmers (1993, p. 24) e foi retirada de uma obra do filósofo empírico-indutivista, D. H. ANTONY.

A argumentação desse filósofo é bem elaborada e está em sintonia com a concepção de ciência ainda prevalente na educação científica, induzindo assim o estudante, desatento ou inexperiente neste tipo de leitura, a concordar com o seu conteúdo. Assim, a Questão 1 exigiu do estudante uma leitura mais atenta e crítica, de modo a identificar o conteúdo empirista subjacente à citação.

Dessa forma, avalia-se que nesta primeira categoria de análise, **A1** evidenciou um desempenho Bom. O que não significa, contudo, que ele tenha superado a sua concepção empirista ingênua. Conforme se procurou evidenciar nos comentários, as suas respostas não são isentas de contradições, antes, revelam o peso de suas concepções empiristas e o confronto com as novas ideias discutidas em sala de aula.

Aluno 2

Questão 1a – O estudante sinalizou em sua resposta a mesma ambiguidade percebida em **A1**.

Sim. Porque as observações que Galileu realizou não eram compatíveis com as idéias pré-concebidas, ou seja, na teoria o movimento era em torno da Terra e não do Sol. Galileu queria construir novas teorias que explicassem os seus dados observacionais, ou seja, uma nova teoria com o Sol sendo o centro do Universo e que a Terra girava a sua volta.

Nível da reflexão crítica: Regular.

A resposta de **A2** fornece indícios de que ele refletiu sobre a questão, contudo, ele não foi capaz de compreender plenamente o enfoque empirista implícito no conteúdo da citação.

Pelo teor das respostas dos alunos **A1** e **A2**, avalia-se que há um conflito entre a posição empirista - sistematicamente reforçada ao longo da graduação - e as concepções epistemológicas contemporâneas que sustentam que as observações estão carregadas de teoria. Esta interdependência entre observação e teoria, ao que parece, vem sendo apreendida por esses alunos, contudo eles ainda não romperam com a concepção empírico-indutivista, o que era previsível tendo em vista que o processo de superação das concepções prévias não é simples e redutível ao contexto de uma disciplina.

Questão 1b – **A2** salientou o vínculo de Galileu com alguns pensadores do passado, inclusive Aristóteles, contudo não sinalizou a influência da teoria de Copérnico na construção da física galileana.

Não. Galileu ao elaborar sua mecânica levou em consideração alguns teóricos do passado, não abandonou as suas pré-concepções de uma hora para outra. Havia teoria de Aristóteles nas idéias de Galileu.

A argumentação do aluno revela que houve reflexão crítica e certo nível de compreensão acerca do papel dos pressupostos teóricos na construção da mecânica galileana.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Questão 2a – **A2** se equivocou ao nomear a posição epistemológica. Contudo, se posicionou criticamente frente à concepção empírico-indutivista.

Posição epistemológica observacional. Para esse autor somente a observação é responsável pela descoberta da ciência. E sabemos hoje

que para construir os conceitos científicos precisamos partir de conceitos teóricos.

A resposta do estudante sinaliza um reflexão e um posicionamento anti-empirista, embora o estudante não tenha ainda se apropriado da expressão correspondente ao posicionamento epistemológico ao qual se opõe.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Comparando-se as três questões da Categoria 1, percebe-se que o A2 evidenciou uma reflexão crítica e uma boa compreensão da relação entre teoria e observação e teoria e experimento. A concepção empírico-indutivista não foi superada, mas o aluno sinalizou que ela vem sendo por ele problematizada.

Aluno 3

Questão 1a – A3 evidenciou uma concordância acrítica com o conteúdo da citação.

[...] Galileu era um homem de observações [...] seus dados eram tratados de forma análoga as sua atitudes, de acordo com o citado no trecho.

Nível de reflexão crítica: Insuficiente.

Questão 1b – O estudante, em sua argumentação, cometeu um grave equívoco, ao tomar um exemplo específico discutido em sala de aula com sendo uma característica de todo o trabalho de Galileu.

Galileu não realizou experimentos, um claro exemplo é o da torre de Pisa, que na sua formulação teórica não tem relação alguma com o experimento.

Em sua resposta **A3** sinaliza não haver desenvolvido uma boa leitura e reflexão do texto sobre Galileu, procurando ater-se tão somente à discussão em sala de aula, onde o pretense episódio da Torre de Pisa foi discutido. Esta atitude o fez usar inapropriadamente um exemplo específico discutido em sala de aula.

É importante assinalar que, no quadro das práticas discente tacitamente assumida pelos alunos, no contexto dessa pesquisa, é muito forte a crença ingênua de que, basta ouvir atentamente a explicação do professor que o trabalho de leitura e estudo sistemático dos textos pode ser dispensado. É possível que, ao longo do curso, as práticas docentes, em várias disciplinas científicas, ao se limitarem em geral à mera resolução mecânica dos problemas, sem exigir dos alunos uma reflexão teórica sobre o significado, o alcance e as limitações das generalizações simbólicas, tenham estimulado os alunos a desenvolver este tipo de comportamento seletivo.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 2a – A3 evidenciou ter compreendido a concepção empírico-indutivista, implícita na citação, e justificou muito bem a sua posição em relação a ela.

A citação tem uma posição indutivista. Quando se trata da ciência como um todo, não podemos tomar uma posição única e exclusiva, pois observação, experimento e teoria se entrelaçam.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

De uma forma geral, o desempenho de **A3** na Categoria 1 foi considerado Insuficiente. Todavia é importante minimizar o peso deste “rótulo”. O desempenho do aluno nas três questões foi irregular, sendo Insuficiente nas **Questões 1a** e **1b**, e, ao mesmo tempo, Muito Bom na **Questão 2a**.

Essa discrepância tão acentuada não parece indicar que ele não tenha desenvolvido uma reflexão crítica e alguma compreensão sobre a interdependência entre observação e teoria, ou entre esta e o experimento. Antes, sugere uma compreensão parcial da questão epistemológica em tela, assim como um conflito com as suas concepções prévias. Isto pode fazer com que diante de um extrato ou citação mais elaborada, este e outros alunos, espontaneamente, recorram a essas pré-concepções de cunho empirista, sistematicamente cultivadas ao longo da graduação e fortemente arraigadas em seus espíritos.

Aluno 4

Questão 1a – A4 salientou com clareza o papel dos pressupostos copernicanos de Galileu em suas observações telescópicas.

Não. Galileu ao olhar através de seu telescópio tinha um olhar copernicano de que o universo celeste (supralunar) não era perfeito, ou seja, ele já tinha suas convicções teóricas, e então com os dados observacionais procurava corroborar suas convicções.

Nível de compreensão: Muito Bom.

Questão 1b – A resposta do estudante evidenciou certa confusão desta questão com a anterior. Contudo, assinalou haver uma relação entre o trabalho experimental de Galileu e os seus pressupostos copernicanos.

Não. Tanto é que os dados observacionais não corroboram a teoria copernicana e mesmo assim ele não a abandonou. A partir dos dados experimentais Galileu ainda era movido a fazer hipóteses.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Questão 2a – A4 evidenciou com clareza a sua compreensão do papel dos pressupostos teóricos do cientista na observação e no experimento.

Podemos nomear como posição empírico-indutivista. Com tudo o que foi estudado até agora, com os artigos sobre a vida e sobre a construção do conhecimento científico dos grandes filósofos, fica claro que a Física não é uma ciência extremamente experimental, pois os cientistas são norteados de hipótese, de convicções teóricas, se fazem observação (experimentação) em relação a algum fenômeno, já trazem toda uma carga teórica em relação a esse fenômeno.

Nível de compreensão: Muito Bom.

Assim, **A4** demonstrou, de forma clara e inequívoca, reflexão crítica e compreensão do posicionamento epistemológico contemporâneo sobre o papel da teoria nas observações e nos experimentos científicos. O seu desempenho na categoria foi considerado Muito Bom.

Aluno 5

Questão 1a – O estudante teceu uma argumentação confusa e com alguns equívocos de natureza histórica. Contudo, foi possível identificar indícios de reflexão crítica.

[...] Na minha opinião não teria como Galileu tratar os dados experimentais sem ter um mínimo de carga teórica para tal procedimento.

Nível de reflexão crítica: Regular.

Questão 1b – **A5** cometeu o mesmo equívoco que **A3**, merecendo assim o mesmo comentário feito anteriormente.

Não. Para elaborar a sua mecânica, Galileu obteve dados experimentais prontos, pois nunca observou nada. Como por exemplo, na Torre de Pisa, Galileu não observou nada.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 2a – O estudante fez uma boa justificativa de seu posicionamento frente à concepção empírico-indutivista.

Podemos nomear como uma posição indutivista. No meu modo de pensar a Física é uma ciência que precisa de dados experimentais, e ao mesmo tempo tem uma carga teórica que é de muita importância. Não tem como todas as leis da Física sair somente da observação. Pois para mim precisamos ter um mínimo de carga teórica para poder fazer um experimento. E é muito difícil não ter preconceitos teóricos.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Dessa forma, o desempenho de **A5** na categoria foi considerado Regular.

Aluno 6

Questão 1a – A justificativa de **A6** se mostrou confusa, contudo foi possível encontrar indícios de reflexão crítica.

Galileu realizou as observações, mas ele tinha um conhecimento em relação ao universo.

Nível de reflexão crítica: Regular.

Questão 1b – O estudante se opôs ao conteúdo da citação. A sua argumentação foi muito singela, mas forneceu indícios de reflexão crítica ou compreensão.

Não, Galileu tinha suas teorias e quando ele acreditava, ele não fez nem sempre procurou a comprovação.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Questão 2a – Na argumentação de **A6** foi possível identificar um posicionamento contrário ao indutivismo e indícios de reflexão crítica com a sinalização da importância dos pressupostos teóricos na atividade experimental. Pode-se perceber que o estudante apresenta certa dificuldade para organizar as ideias na forma escrita.

Esse contexto dever ser refutado, pois a ciência não é apenas experimental, nem só teórica. Na ciência para que um fato seja testado, deve existir um pressuposto teórico por trás, a teoria para que comprovada deve fazer um experimento, mas segundo estudos nem sempre teoria é totalmente comprovada com a experiência.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

O desempenho de **A6** na categoria foi avaliado como Regular.

Aluno 7

Questão 1a – **A7** evidenciou um posicionamento crítico frente ao conteúdo da citação, salientando a importância dos pressupostos teóricos no trabalho de Galileu.

Galileu tinha uma postura diante a uma teoria de que se ela não pode ser provada experimentalmente ela não passa de algo que não existe na realidade, porém, a teoria não é necessariamente construída a partir desses dados. Uma teoria já existe na mente do pesquisador e de certa forma ela influencia a maneira como os dados são analisados.

Para ilustrar o seu argumento, **A7** assinala que, um escolástico ao observar um fenômeno pelo telescópio poderia atribuir a este fenômeno uma interpretação distinta daquela dada por Galileu, o que este

considerava ser “um astro girando em torno de outro astro”, não o era para o escolástico.

Isso explicita que conforme a teoria primeira de Galileu antes de fazer a observação, aquele movimento observado poderia ser interpretado como um astro girando, ou orbitando, ao redor de outro. Para outra pessoa, conforme a teoria prévia da mesma, aquele movimento não poderia ser de uma órbita.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 1b – A7 evidenciou de forma clara haver compreendido o papel dos pressupostos copernicanos de Galileu na elaboração de sua mecânica.

Galileu não é guiado unicamente pelos dados experimentais. Galileu cria no modelo de Copérnico, onde a Terra era um planeta, e juntamente com os outros planetas orbitava ao redor do Sol. Essa é uma consideração prévia e metafísica para Galileu.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 2a – O estudante fez uma boa exposição de seu posicionamento anti-indutivista.

É uma posição indutivista ingênua. Não tenho uma posição favorável a essa concepção. Considero que é impossível realizar qualquer atividade científica sem conceitos prévios na mente do observador. Para um experimento ser realizado, o pesquisador necessita selecionar variáveis parâmetros mais importantes desprezando outros e isso deixa claro a existência de conceitos prévios.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Percebe-se assim que **A7**, nas três questões da categoria, forneceu evidências claras de reflexão crítica e compreensão da influência dos pressupostos teóricas no trabalho observacional e experimental de Galileu e outros cientistas. Configurando assim, um desempenho Muito Bom.

Comentários sobre o desempenho dos alunos na Categoria 1

Pode-se inferir a partir da análise empreendida que todos os alunos evidenciaram ou forneceram indícios de reflexão crítica ou compreensão da interdependência entre observação e teoria e entre esta e o experimento. Todavia, cotejando-se as respostas de cada aluno às diferentes questões proposta, percebe-se que a compreensão dessa interdependência não parece ser tranquila e isenta de contradições.

Por exemplo, a primeira citação do questionário, referente às **Questões 1a e 1b**, e a segunda, referente à **Questão 2a**, são ambas de natureza empírico-indutivista. No entanto, apenas os alunos A4 e A7 demonstraram nas três questões uma boa compreensão da mensagem implícita em ambas as citações e um posicionamento crítico mais incisivo em relação a ela. Os demais, diante da primeira citação, deram respostas ambíguas, confusas, e mesmo Insuficientes.

Esses resultados revelam o peso das concepções prévias, de natureza empírico-indutivista, dos estudantes e indicam que, de forma geral, o trabalho de intervenção didática perturbou o espírito dos estudantes em relação à aceitação passiva e acrítica dos pressupostos empírico-indutivistas, sintetizado em assertivas como: o conhecimento surge com a observação, livre de carga teórica; o conhecimento científico é obtido dos fenômenos, via aplicação do método científico (CHALMERS, 1993; SILVEIRA, 1996).

É importante assinalar que vários estudos realizados diagnosticaram que esta concepção é bastante forte entre professores, estudantes e mesmo cientistas (GIL et al., 2001; PAIXÃO; CACHAPUZ, 2001; HARRES, 1999). Outros estudos, analisando propostas de intervenção com o intuito de modificar este quadro, têm apontado mudanças significativas entre os estudantes no sentido de adquirir concepções menos simplistas e mais contextualizadas sobre a ciência. No entanto, esses estudos também assinalam a dificuldade de superação de algumas noções fortemente arraigadas na mente dos estudantes, algumas intimamente vinculadas à concepção empírico-indutivista (TEIXEIRA; FREIRE JR; EL-HANNI, 2009; OKI; MORADILO, 2008). Esta dificuldade também foi observada entre os participantes da presente pesquisa.

Assim, os resultados obtidos nessas questões forneceram indícios de que o trabalho de intervenção didática parece ter contribuído para que os estudantes desenvolvessem uma melhor compreensão acerca da interdependência entre observação/experimento e teoria, sobre o papel dos pressupostos teóricos nos trabalhos de cientistas como Copérnico,

Galileu, Kepler e Newton, não obstante a subsistência e o salutar conflito das antigas noções do estudante, com as reflexões históricas e epistemológicas discutidas no trabalho de intervenção.

Categoria 2 – A historicidade da ciência

Nesta categoria foram reunidas **Questões: 3a, 3b, 4a, 4b e 8**. No quadro 2, encontram-se sintetizados os resultados alcançados pelos alunos na categoria.

No quadro 2 pode-se observar que dos 7 alunos participantes, 2 obtiveram um resultado Muito Bom (**A4 e A7**), 4 alunos alcançaram um resultado Regular (**A1, A2, A3 e A5**) e um aluno teve um desempenho considerado Insuficiente (**A6**).

A análise individual dos alunos, apresentada a seguir, mostra que o desempenho dos alunos de nível Regular, excetuando-se **A5**, nas 5 questões da categoria, apresenta altos e baixos. Em algumas questões esses alunos mostram pouca reflexão, em outras tecem argumentos muito bons, fornecendo indícios de que, apesar das dificuldades que eles tiveram em estudar de forma mais atenta e crítica os textos discutidos em aula, progressos foram feitos no sentido de superar uma postura discente passiva, acrítica e até resistente ao exercício da problematização.

Quadro 2 - Resultados obtidos na Categoria 2 (A historicidade da ciência)

Aluno	Questão 3a	Questão 3b	Questão 4a	Questão 4b	Questão 8	Desemp na categoria
A1	Regular	Bom	Insuficiente	Bom	Regular	Regular
A2	Regular	Muito Bom	Insuficiente	Bom	Muito Bom	Regular
A3	Regular	Regular	Bom	Insuficiente	Muito Bom	Regular
A4	Bom	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
A5	Regular	Regular	Insuficiente	Regular	Regular	Regular
A6	Insuficiente	Regular	Insuficiente	Insuficiente	Regular	Insuficiente
A7	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Convém salientar que, para além do “rótulo qualitativo”, esses resultados sugerem que esses estudantes iniciaram um processo de

reflexão crítica e adquiriram certa compreensão acerca dos aspectos sócio-históricos da natureza da ciência contemplados na categoria.

Aluno 1

Questão 3a – O estudante não levou em conta o fato de a Igreja admitir a teoria de Copérnico enquanto instrumento de cálculo. A sua argumentação situou-se no plano filosófico-religioso.

Galileu buscou aceitar a nova ciência que estava nascendo. A Igreja, ao contrário, para manter a ordem, foi contra as ideias copernicanas pois elas fugiam às explicações do mundo defendido pela Igreja.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Questão 3b – Assinalou apenas as implicações religiosas.

Sim. Religiosamente, se a Igreja aceitasse as ideias de Copérnico estaria indo contra as leis de Deus e aceitando o pensamento de um mortal, no caso o Copérnico, o que era inconcebível naquela época. Exemplo. Para Galileu a Terra estava em movimento, para a Igreja estava parada.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Questão 4a – Resposta equivocada

O movimento circular.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 4b – **A1** sinalizou haver refletido sobre a questão ao comentar a importância dos problemas relacionados à teoria de Copérnico para a geração de estudiosos que o sucederam.

Sim. Os físicos e os astrônomos posteriores a Copérnico buscaram explicações sobre essas 'teorias', já que o próprio Copérnico explicava de forma vaga e não eram aceitas por esses físicos e astrônomos posteriores a ele.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Questão 8 – A argumentação de **A1** forneceu indícios de reflexão crítica e compreensão da questão. A associação entre as pesquisas dos filósofos naturais e as inovações tecnológicas, aparece de forma implícita.

Pode ser associada às inovações vigentes, pois a necessidade devido a evolução na ciência tornou necessária a produção de novos aparatos experimentais para explicar e acompanhar a evolução da nova ciência.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular

O desempenho de **A1** na categoria foi considerado Regular.

Aluno 2

Questão 3a – **A2** não explicitou a diferença entre o enfoque instrumentalista da Igreja e a postura realista de Galileu. Contudo, ele parece sinalizar, ainda que de forma tímida, esta diferença.

Galileu afirmava que a Terra não estava no centro do universo e isso ia contra os princípios da Igreja que afirma ser o homem a imagem e semelhança de Deus e por esse motivo a sua morada é o centro do universo.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Questão 3b – **A2** transcendeu o contexto religioso e evidenciou haver refletido sobre as implicações políticas e ideológicas do enfoque galileano para a teoria de Copérnico.

Sim. Bom, como já respondi na questão 3a, a Igreja tinha o poder absoluto, e o que colocasse em dúvida os ensinamentos por ela transmitidos, seria uma heresia e com isso se não houvesse inquisição, as pessoas começariam a duvidar da Igreja afetando diretamente o poder aquisitivo, religioso e ideológico mantido pela igreja.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 4a – A resposta de **A2** foi equivocada, pois não apontou nenhum dos problemas da teoria de Copérnico.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 4b – A argumentação de A2 evidenciou reflexão crítica e compreensão da questão.

Sim. Porque ao revisar os conceitos de Copérnico surgiram novas gerações de físicos e astrônomos como Tycho e posteriormente Kepler que aperfeiçoou o modelo copernicano com novos ajustes em sua teoria.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Questão 8 – A2 argumentou que a atitude dos pensadores citados não é isolada. Assinalou a não neutralidade da ciência, que procurou exemplificar como o apoio político financeiro dado à construção dos instrumentos científicos de Tycho Brahe, e com o fato de Galileu ter procurado o Arsenal de Marinha de Veneza, para negociar a luneta que acabara de aperfeiçoar. Assim, o aluno evidenciou reflexão crítica e compreensão da influência recíproca entre ciência e tecnologia no trabalho dos pensadores assinalados.

A atitude desses pensadores não era isolada. Por que a ciência não é neutra. Como exemplo podemos observar na história de Tycho, os instrumentos construídos na sua época eram patrocinados por reis, príncipes e o gasto era absurdo, tudo em nome da ciência e de novas descobertas. Galileu monta sua primeira luneta e aperfeiçoa de modo a ver até luas em júpiter. Essa evolução dependia da associação às inovações ligadas à esfera da produção material, intelectual e artística de suas épocas.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Conforme se evidenciou na análise acima, nas cinco questões que compõem a categoria, A2 revelou um resultado Insuficiente apenas na **Questão 4a**. Nas **Questões 3b** e **8**, A2 obteve o nível Muito Bom; em **4b** alcançou o nível Bom, e em **3a** teve um desempenho Regular. A argumentação do estudante nestas questões sinaliza que ele desenvolveu reflexão crítica e certa compreensão acerca do caráter histórico da ciência.

Em função do nível insuficiente alcançado na **Questão 4a**, o desempenho geral de A2 na categoria foi classificado como Regular.

Aluno 3

Questão 3a – O estudante forneceu indícios de haver refletido sobre a questão. A sua argumentação foi semelhante à de **A2**.

Galileu assumia uma postura contrária a igreja, quanto ao universo, pois ele não acreditava em uma influência divina na ordem do universo.

É interessante observar que, Galileu ao buscar uma explicação racional para o universo afasta-se da visão cosmológica da Igreja, no entanto ele não deixou de ser um bom Católico.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Questão 3b – O estudante deu continuidade à argumentação feita em 3a, fornecendo uma justificativa muito curta e circunscrita ao contexto religioso.

Sendo assim, isto contrapunha os ensinamentos religiosos.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Questão 4a – **A3** apontou o problema da queda dos corpos, em uma Terra que deixa de ser o centro do universo, e a paralaxe estelar, que não foi observada pelos contemporâneos e sucessores imediatos de Copérnico.

Para Copérnico o Sol era o centro, e se o Sol era o centro do universo os objetos deveriam cair em direção ao mesmo, teriam uma trajetória diferente, a paralaxe estelar não foi possível de ser observada e muito menos medida.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Questão 4b – Não foi respondida.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 8 – **A3** forneceu evidências de reflexão crítica e compreensão sobre a influência do contexto sócio histórico na produção científica dos pensadores assinados.

De acordo com o que foi estudado em relação a esses pensadores, podemos verificar que suas atitudes e invenções não foram isoladas, um bom exemplo é a história de Tycho que para obter seus aparatos experimentais teve ajuda de Frederico II que não só lhe forneceu o investimento financeiro como também o local para a realização de seus experimentos e observações (o lugar era conhecido como Uraniborg).

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Das cinco questões propostas o estudante deixou de responder a **Questão 4b**, obtendo um resultado Insuficiente. Nas demais questões ele obteve: Muito Bom em (8), Bom em (4a) e Regular em (3a), configurando assim um resultado geral classificado como Regular.

Dessa forma, avalia-se que o estudante sinalizou ter refletido e desenvolvido certa compreensão sobre o caráter histórico da ciência.

Aluno 4

Questão 3a – A argumentação de **A4** evidenciou reflexão crítica e compreensão da diferença entre os enfoques da Igreja e de Galileu.

A postura de Galileu era que a Terra não estava parada, já que o mesmo era seguidor das idéias de Copérnico, e a partir de observações telescópicas Galileu pode observar que o mundo supralunar não era perfeito, como dizia Aristóteles. A igreja havia adotado Aristóteles, ou aperfeiçoado as idéias de Aristóteles para que concordassem com a sua ideologia. A terra como centro do universo e todos os outros planetas girando em torno da mesma.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Questão 3b – O estudante conseguiu transcender o contexto religioso, evidenciando que as implicações religiosas se articulavam ao contexto ideológico e político.

Sim. Pois como o mundo celeste que ressaltava a divindade de Deus não era perfeito, estava como a terra sujeito a mudanças, indo contra o que a igreja pregava, poderiam surgir desconfianças em relação a veracidade da ideologia que a igreja pregava, e isso poderia enfraquecer a igreja, que detinha grandes poderes políticos.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 4a – A4 evidenciou reflexão crítica e certa compreensão dos problemas associados à teoria copernicana. O aluno indicou o fato de os corpos, ao serem lançados verticalmente para cima, retornarem ao ponto de partida.

Se a terra está em movimento, um objeto ao ser jogado para cima retornaria um pouco deslocado da posição inicial o que não acontecia.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Questão 4b – Houve evidência de reflexão crítica e compreensão da importância histórica e científica dos problemas suscitados pelo modelo copernicano.

Os problemas a serem resolvidos na teoria de Copérnico, foram um tanto quanto estimulantes para as gerações posteriores a ele. Pois os cientistas ao tentarem encontrar provas de que a teoria de Copérnico era válida acabavam por descobrir coisas novas a respeito da natureza. Kepler e Galileu são exemplos disso. Apesar de todos os problemas em sua teoria, Copérnico abriu um leque de novas idéias que influenciaram os novos cientistas.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 8 – A4 salientou o caráter cooperativo da atividade científica, explicitando a interação entre o saber teórico dos sábios e o saber técnico dos artesãos.

Tycho não conseguiria construir seus gigantescos instrumentos de observação sem a ajuda de pessoas ricas e com alto poder aquisitivo. E para construí-los foi preciso a ajuda de pessoas com habilidades práticas, como artesãos. Então teoria científica e construída em cooperação não é apenas o seu idealizador isoladamente.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Dessa forma, as resposta de **A4** evidenciaram um desempenho Muito Bom na categoria.

Aluno 5

Questão 3a – A resposta de **A5** foi curta, sugerindo apenas indícios de reflexão crítica ou compreensão da questão proposta.

Galileu em sua teoria colocava o Sol como sendo o centro do Universo e a igreja não aceitava esta postura, que vinha desde Copérnico.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Questão 3b – O estudante sinalizou as implicações sociais ao se referir à influência da Igreja na sociedade.

Sim. Se a Igreja aceitasse o Sol como sendo o centro do Universo, poderíamos ter um contexto totalmente diferente do que temos hoje. Pois a Igreja influenciava muito na sociedade.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Questão 4a – **A5** não apontou nenhum dos principais problemas científicos que dificultavam a aceitação de sua teoria.

A terra como não sendo o centro do universo e colocando este centro como sendo próximo ao Sol.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 4b – A resposta curta de **A5** fornece alguns indícios de reflexão crítica.

Sim. Pois tiveram que ajustar estes problemas a sua teoria tentando explicar para que fosse uma verdade e não apresentasse mais erros.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Questão 8 - A argumentação do aluno fornece alguns indícios de reflexão crítica ou compreensão da influência do contexto sócio histórico sobre a atividade científica.

Em suas observações estes pensadores não são isoladas das inovações da produção material, intelectual e artística. Para as suas teorias os mesmos convivem em uma sociedade ao qual pode estar modificando os pensamentos em diversas áreas. A teoria desses pensadores não é totalmente neutra, sem preconceitos.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Das cinco questões que compõe a Categoria 2, o estudante obteve um desempenho Insuficiente apenas na **Questão 4a**. Nas demais o estudante obteve desempenho Regular. Dessa forma, avaliou-se que o desempenho geral de **A5** na categoria poderia ser considerado Regular.

Aluno 6

Questão 3a - A argumentação de **A6** foi confusa, genérica, não sinalizando uma reflexão crítica sobre o que foi proposto.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 3b – A justificativa de **A6** foi muito curta, mas sugere alguns indícios de reflexão crítica.

Sim, porque mudaria a concepção, criando dúvidas sobre tudo o que a igreja pregava.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Questão 4a – Não foi respondida pelo aluno.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 4b – Também não foi respondida pelo aluno.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 8 – A argumentação de **A6** foi de caráter genérico e se desviou do foco da questão. Contudo sugeriu algum indício de reflexão.

Não é isolada, a busca pelo conhecimento e por inovação faz com que a ciência seja cada vez mais aprimorada, um exemplo disso é o acelerador de partículas, as células tronco. As observações despertam a curiosidade, e a busca do saber, e apenas buscando saber se encontra e faz descobertas científicas significativas.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular

O resultado obtido pelo **Aluno 6** na categoria configurou-se como: Insuficiente.

Aluno 7

Questão 3a – O estudante explicitou com clareza haver compreendido a diferença assinalada.

Para Galileu a Terra e os outros planetas orbitavam ao redor do Sol e isso era uma realidade física para ele. Para a Igreja, essa proposição poderia ser concebida apenas como uma atividade mental, com um artifício de cálculo, desprovido de vínculo com a realidade.

Nível de reflexão compreensão: Muito Bom.

Questão 3b - De forma clara e inequívoca, A7 explicitou que as implicações religiosas do enfoque galileano estavam intimamente vinculadas ao contexto político e ideológico da época.

A posição que a Igreja ocupava, com tanto poder, implicava que a realidade da Bíblia deveria ser a realidade do mundo físico. Qualquer pensamento diferente deste era abstrato e sem correspondência com a realidade e portanto, não poderia ser a forma de pensar oficial. Nas escolas e universidades era ensinado o pensamento oficial e a Terra deveria ser ensinada como sendo o centro do universo. Essa atitude tenta impedir que as pessoas pensem ou tenham acesso a idéias novas e isso deveria garantir uma sociedade formada por pessoas obedientes pensando como a maioria e mantendo o sistema político da época.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 4a – A7 sintetizou a questão apontando a necessidade de uma nova física para o modelo de Copérnico.

O problema da necessidade de uma nova física para explicar seu modelo e de que fenômenos como a paralaxe estelar não serem observados na sua época.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom

Questão 4b – A7 evidenciou reflexão crítica e compreensão acerca do caráter histórico da ciência.

Sim, os trabalhos realizados posteriormente permitiram ou foram conduzidos de forma que com dados mais precisos como os de Tycho Brahe e pelo esforço enorme de vários pensadores uma nova física fosse estabelecida juntamente com novas ferramentas matemáticas utilizadas para trabalharem com esse novo modo de observar os fatos.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 8 – O estudante assinalou com clareza a associação entre as pesquisas dos filósofos naturais mencionados e as inovações tecnológicas em curso.

É ligada á esfera da produção material, ou seja o desenvolvimento de técnicas de manipulação de metais, produção de lentes é que de certa forma permitiram o desenvolvimento dos equipamentos. Galileu não foi o inventor da estrutura original de seu telescópio, mas o aperfeiçoou de tal maneira que ele se tornou muito mais eficiente. E antes de realizar pesquisas com ele foi vende-lo para a força naval de sua região, ganhando remuneração e prestígio por isso.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Em sua argumentação percebe-se que o estudante, conseguiu explicitar com clareza que os produtos da atividade científica desenvolvidas por Tycho Brahe e Galileu, não tinham apenas um interesse intrínseco, mas apresentavam desdobramentos práticos em distintos setores da sociedade mercantil, conforme salientado por Bernal (1997).

O desempenho do **Aluno 7** na categoria configurou-se como: Muito Bom.

Comentários sobre o desempenho dos alunos na Categoria 2

Nesta categoria, com exceção do **Aluno 6**, que obteve um resultado Insuficiente, os demais evidenciaram um desempenho que, a princípio, pode ser considerado satisfatório. Os estudantes **A4** e **A7** alcançaram o nível Muito Bom, demonstrando nas cinco questões da categoria uma boa compreensão acerca da historicidade da ciência. Já os alunos **A1**, **A2**, **A3** e **A5** obtiveram o nível Regular.

As respostas dos alunos na Categoria 2 forneceram indícios de que o trabalho de intervenção didática propiciou uma satisfatória contribuição no sentido de desenvolver nos estudantes uma visão de ciência que, não obstante a sua lógica interna, apresenta uma dimensão histórica, filosófica e cultural, não sendo imune às influências e injunções do contexto sócio-histórico (MEDEIROS, 2007; EL - HANI; TAVARES; ROCHA, 2004).

É importante salientar que a **Questão 4a** poderia ser respondida pelos alunos usando basicamente os conhecimentos científicos adquiridos pelos mesmos na disciplina de Mecânica oferecida no primeiro ano e Mecânica Clássica, que aparece no terceiro. Contudo, verificou-se que essa questão foi respondida de forma equivocada pelos alunos **A1, A2, A5 e A6**. Isto sinaliza que esses alunos chegaram à disciplina de Evolução dos Conceitos de Física com um déficit conceitual, que poderia ter sido resolvido nas disciplinas acima assinaladas.

Dessa forma, verifica-se que, além das dificuldades inerentes à compreensão dos aspectos históricos e epistemológicos, alguns alunos apresentaram também lacunas de ordem conceitual. Este detalhe revela que, se por um lado a disciplina de Evolução apresenta um notável potencial pedagógico no sentido de promover nos alunos uma melhor compreensão da natureza da ciência e seus conceitos, ela também apresenta limites reais, associados a problemas na formação dos estudantes, que não podem ser desconsiderados.

Cabe assinalar ainda que em geral os estudantes de ciências naturais têm um conhecimento de história e filosofia relativamente limitado (EL-HANI, 2007), uma lacuna intelectual que também se estende à história e filosofia da ciência (KUHN, 1979). No contexto da presente pesquisa percebeu-se também que as práticas docentes vigentes no Curso de Física, em geral, não valorizaram e estimularam nos estudantes o hábito de leitura e discussão sistemática de textos. Mas, ao que parece, de modo geral, os alunos têm desenvolvidos esforços para superar essa dificuldade.

Essas deficiências ressaltam a importância e o potencial pedagógico da história e filosofia da ciência no sentido de promover nos estudantes, futuros docentes, o desenvolvimento de habilidades fundamentais a um moderno ensino de Física, de modo que esta ciência seja apresentada como produção cultural. Mas, em contrapartida, também revelam que a história e a filosofia da ciência têm limitações, algumas delas intimamente vinculadas à tradição de ensino dogmática e a-histórica. Situação que alguns educadores pretendem transformar.

Categoria 3 – O caráter provisório, mutável e inventivo do conhecimento científico

Nesta categoria foram agrupadas as **Questões 6 e 7**. Os resultados alcançados pelos alunos encontram-se sintetizados no quadro 3. Neste, pode-se verificar que apenas o **Aluno 6** obteve um resultado considerado Insuficiente. O restante da turma alcançou os seguintes resultados: Muito Bom (**A2 e A7**); Bom, (**A3 e A5**) e Regular, (**A1 e A4**). Após o quadro 3, apresenta-se uma análise detalhada do desempenho de cada aluno na categoria.

Quadro 3 – Resultados obtidos na Categoria 3 (O caráter provisório, mutável e inventivo das teorias e conceitos científicos)

Aluno	Questão 6	Questão 7	Desempenho na Categoria
A1	Muito Bom	Insuficiente	Regular
A2	Bom	Muito Bom	Muito Bom
A3	Regular	Muito Bom	Bom
A4	Muito Bom	Insuficiente	Regular
A5	Regular	Muito Bom	Bom
A6	Insuficiente	Insuficiente	Insuficiente
A7	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Aluno 1

Questão 6 – O estudante se posicionou criticamente frente ao conteúdo da citação, explicitando que aos 23 anos as concepções teóricas de Newton não poderiam conduzi-lo à lei da gravitação universal.

No período de 1665, quando Newton tinha 23 anos de idade, ainda não seria possível fazer essa afirmação, pois durante esse período, a sua concepção teórica não lhe oferecia suporte a fazer tal afirmação.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 7 – O estudante se equivocou em sua resposta, atribuindo a Newton uma inércia circular e a Galileu uma inércia retilínea.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

O desempenho de **A1** na categoria foi considerado Regular

Aluno 2

Questão 6 – O estudante criticou a lenda da maçã e destacou que a teoria da gravitação exigiu de Newton anos de esforço intelectual.

Newton não definiu a lei da gravidade somente porque viu uma maçã caindo. Ele passou anos de sua vida fazendo observações, cálculos, entre outros para encontrar essa força gravitacional que existe hoje.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Questão 7 – **A2** foi sucinto e claro em sua resposta.

Sim. Para Galileu a inércia poderia ser circular. Para Newton a inércia é somente retilínea.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom

O desempenho de **A2** na categoria foi considerado Muito Bom

Aluno 3

Questão 6 – **A3** sinalizou haver refletido sobre a questão, pois salientou o fato de Newton ter assumido a força centrípeta como uma força de gravitação universal. Todavia, este passo não se deu no período assinalado na citação. Esta informação não foi percebida, ou foi aceita acriticamente pelo aluno, em conformidade com o que foi por ele estudado na disciplina de mecânica.

De acordo com a citação e com o estudado, podemos dizer que Newton compreendeu que a força centrípeta na verdade era uma força gravitacional, na qual não só a lua mas todos os objetos estavam vinculados a ação desta força.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Questão 7 – A resposta de **A3** foi clara, e forneceu evidências de reflexão crítica e compreensão sobre a diferença do conceito de inércia em Galileu e Newton.

Para Galileu havia a possibilidade de um movimento circular, já para Newton não era possível pois teria que haver uma aceleração, para Newton o movimento era retilíneo.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

O estudante evidenciou na categoria um desempenho que foi considerado Bom.

Aluno 4

Questão 6 – O estudante criticou o conteúdo da citação, argumentando que as concepções teóricas de Newton na época assinalada não lhe permitiriam chegar à gravitação universal, salientou ainda que a lenda da maçã dá uma ideia distorcida do que representou o esforço intelectual de Newton.

Newton não teve a ideia de gravitação universal observando a queda de uma maçã, até porque ele não tinha pressuposto teórico para isso. Essa afirmação quebra todo encanto do trabalho de Newton, porque ele não construiu a ideia de gravitação com tanta simplicidade, apenas observando a queda de uma maçã, ele teve toda uma trajetória marcada por erros e acertos.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 7 – Não foi respondida por **A4**.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

O desempenho evidenciado por **A4** foi considerado Regular.

Aluno 5

Questão 6 – O estudante forneceu indícios de reflexão crítica frente ao conteúdo da citação.

Newton propõe a gravitação como um mundo que existe o vazio. Newton não viu uma maçã cair em sua cabeça para poder prever a teoria da gravitação.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Questão 7 – A5 evidenciou reflexão crítica e compreensão da mudança ocorrida no conceito de inércia, não obstante alguns problemas em sua redação.

Para Galileu a inércia poderia ter um movimento circular. Para Newton a inércia poderia ter um movimento somente retilíneo. Os dois apresentaram diferentes formulações para o princípio da inércia.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

O desempenho evidenciado por A5 foi considerado Bom.

Aluno 6

Questão 6 – O estudante não analisou a citação. A sua resposta foi equivocada e sem vínculo com o que foi solicitado.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 7 – O estudante assinalou, equivocadamente, que Galileu e Newton apresentavam uma concepção de inércia circular.

Não, Newton acreditava num movimento inercial circular, e Galileu mesmo com concepções um pouco diferentes partia para o mesmo pressuposto.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

O desempenho de A6 na categoria foi considerado Insuficiente.

Aluno 7

Questão 6 – O aluno se posicionou de forma crítica em relação ao conteúdo da citação, salientando o grande esforço intelectual de

Newton, a sua dívida com aqueles que o precederam e a sua interação intelectual com Robert Hooke.

Forças agindo a distância, sem um contato, isso é algo totalmente novo. Apesar de Newton não ter realizado a “experiência da maçã que caiu em sua cabeça” e disso formulado sua teoria de gravitação, ele por um processo de grande esforço e formulações matemáticas chegou nessas conclusões. Não foi um trabalho totalmente isolado de discussões com outros pensadores, Kepler já havia formulado suas leis e grandes pensadores como Hooke já pensavam e discutiam a existência de uma relação de proporcionalidade com o inverso do quadrado da distância [...]. O que não se conseguia era realizar as formulações matemáticas corretas em conformidade com as relações encontradas por Kepler. E nisso Newton foi brilhante sabendo, após muitas trocas e diálogos com Hooke e estudando os vários pensadores como Descartes e Galileu, bem como os trabalhos de Kepler, que deveria existir algo que conectasse todo esse emaranhado de ideias. Newton melhorou as teorias já existentes corrigindo o que considerava como erro e rompendo ao mesmo tempo com elas. Por isso o trabalho de Newton foi inovador e rompeu com o que até então existia.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 7 – A resposta de **A7** foi clara, evidenciando reflexão crítica e compreensão da diferença entre os conceitos de ambos os cientistas.

Sim. Para Galileu poderia haver uma inércia circular, para Newton a inércia era apenas para os movimentos retilíneos ou parados. O movimento circular newtoniano era acelerado, sendo uma componente do movimento acelerada para o centro e uma componente tangencial do movimento sendo inercial.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

O desempenho de **A7** na Categoria 3 foi considerado, Muito Bom.

Comentários sobre o desempenho dos alunos na Categoria 3

Nesta categoria, com exceção de **A6**, os demais estudantes obtiveram um desempenho satisfatório.

Na **Questão 6**, os estudantes evidenciaram um posicionamento crítico frente à lenda da maçã, além de destacarem que no período histórico assinalado na citação as concepções teóricas de Newton não lhe permitiriam formular a lei da gravitação universal.

É importante assinalar que a citação analisada nesta questão foi retirada de um manual de ensino muito usado pelos alunos (HALLIDAY, RESNICK; WALKER, 1996, p.51), e que outros manuais semelhantes repetem acriticamente que Newton formulou a lei da gravitação universal por volta dos 23 anos de idade. Um exemplo clássico do que Whitaker (1979) classificou como “quase-história”.

O fato dos alunos se posicionarem criticamente frente à citação forneceu indícios de que o trabalho de intervenção didática, conduzido pelo pesquisador, apresentou resultados profícuos.

Na **Questão 7**, os alunos foram solicitados a explicitar se havia diferença entre as formulações para o princípio da inércia apresentados por Galileu e Newton. Em geral, os diversos manuais usados na graduação não apresentam esta diferença, e apresentam a inércia de Newton como idêntica a de Galileu.

Com as **Questões 6 e 7**, procurou-se suscitar nos estudantes a reflexão crítica acerca da ideia de que construção de um conceito ou teoria científica é, na maioria das vezes, um processo intelectual lento, sujeito a avanços e retrocessos, acertos e erros, que normalmente não são mencionados nos livros textos, passando ao estudante a ilusão de que a ciência é uma atividade empreendida por gênios isolados (GIL et. al, 2001).

Categoria 4 – Contribuições da intervenção didática para a reflexão do aluno sobre o potencial educativo da história e filosofia da ciência no ensino de física

Nesta categoria foram agrupadas as **Questões 2b, 4c e 5**. Os resultados alcançados pelos estudantes estão sintetizados no quadro 4.

Quadro 4 - Resultados obtidos na Categoria 4 (Contribuições da intervenção didática para a reflexão do aluno sobre o potencial educativo da história e filosofia da ciência no ensino de física)

Aluno	Questão 2 Letra b	Questão 4 Letra c	Questão 5	Desempenho na categoria
A1	Bom	Insuficiente	Muito Bom	Regular
A2	Insuficiente	Insuficiente	Muito Bom	Insuficiente
A3	Bom	Bom	Bom	Bom
A4	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
A5	Regular	Regular	Bom	Regular
A6	Insuficiente.	Insuficiente	Regular	Insuficiente
A7	Muito Bom.	Muito Bom.	Muito Bom	Muito Bom

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Aluno 1

Questão 2b – A argumentação de **A1** evidenciou reflexão crítica e compreensão das limitações da concepção empírico-indutivista para a reflexão do estudante sobre o processo de construção do conhecimento científico.

Não. A citação dá uma visão de que a ciência só se baseia unicamente em um caminho, o das observações, o que não acontece realmente. Pois durante todo o período da evolução da ciência foi necessário o rompimento de vários pensamentos para a sua evolução. Sendo assim, olhando a citação, pode-se dizer que ela não traz uma compreensão das transformações científicas.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Nesta questão o estudante forneceu uma nova evidência de que se encontra em processo de reflexão e compreensão da interdependência entre observação e teoria (C1). Além disso, o estudante explicitou que considera a posição empírico-indutivista inadequada à compreensão do

processo de produção e transformação das ideias científicas. O que está em sintonia com as posições de Kuhn (1996) e Bachelard (1996).

Questão 4c – O estudante não respondeu a questão. É interessante assinalar que a questão anterior (**2b**) está relacionada a esta. No entanto, **A1** não percebeu esta relação.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 5 – **A1** argumentou que a contextualização poderia minimizar a aridez das fórmulas apresentadas em sala de aula, ao revelar à dimensão histórica do conhecimento científico.

Sim. Uma abordagem da contextualização histórico-cultural poderia enriquecer o conhecimento dos estudantes, os ajudaria a enxergar sobre a história escondida por trás das fórmulas que é apresentada nas salas de aula.

A argumentação do estudante está em sintonia com a posição de alguns pesquisadores que defendem o uso da história e filosofia da ciência na educação científica (BATISTA, 2007; BASTOS, 2002).

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

O desempenho de **A1** na categoria foi considerado Regular.

Aluno 2

Questão 2b – A argumentação de **A2** evidenciou um posicionamento acrítico em relação às limitações da posição empírico-indutivista.

Sim. Porque na época de Copérnico, os cientistas eram observacionais e com o passar do tempo houve mudanças levando o conhecimento a um nível mais elevado e transformando a posição epistemológica implícita em teorias observacionais e experimentais.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 4c – Parece não ter sido compreendida por **A2**, pois a sua argumentação fugiu completamente à discussão proposta.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 5 – O estudante defendeu a importância da abordagem contextual, na minimização do excesso de fórmulas presente no ensino de física. Avaliou ainda que o licenciando além de se apropriar dos conhecimentos advindos dessa abordagem deveria integrá-los à sua futura ação docente.

Sim. O aluno atual é manipulado a apenas conhecer fórmulas, equações e saber quem as inventou, não é do interesse dos professores perder tempo, repassar para o aluno todo o conhecimento histórico científico e quais as dificuldades desses cientistas para ser reconhecida as suas descobertas e novas teorias.

Eu mesmo, não conhecia a história da ciência tão profunda, posso dizer então, era uma aluna de Física leiga no conteúdo histórico. É muito importante que o aluno tenha esse conhecimento e repasse ele para seus futuros alunos quando professor.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Apesar do **Aluno 2** ter obtido um resultado Muito Bom na **Questão 5**, o seu resultado na categoria foi considerado Insuficiente.

Aluno 3

Questão 2b – O estudante não declarou explicitamente que a posição empírico-indutivista fosse limitada, mas destacou a importância de não se ater a um único posicionamento. A sua argumentação se mostrou ambígua, pois, se por um lado sugere o reconhecimento de que é necessário propiciar ao estudante uma compreensão mais rica das transformações científicas, por outro desconsidera a limitação da concepção empírico-indutivista para produzir esta compreensão.

Avalia-se que o estudante sinalizou haver refletido sobre a questão. Todavia, ao que parece, a tradição de ensino a-histórica e dogmática vivenciada por ele desde a educação básica e ao longo da graduação, exerceu uma forte influência sobre o seu posicionamento.

Se partirmos apenas de um único posicionamento não é possível passar ao aluno todo o contexto envolvido quanto as transformações científicas e as mudanças de um período histórico, pois se o fizermos esta não estará completa em todos os seus aspectos.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Questão 4c – A3 sinalizou ter desenvolvido alguma reflexão sobre a questão. A sua argumentação foi concisa e externou a sua dúvida sobre a relevância de se discutir os problemas científicos relacionados à teoria de Copérnico.

Para o ensino-aprendizagem da mecânica e gravitação de Newton, não posso dizer com certeza se esses problemas teriam influência, isso dependeria da forma como o aluno aceitasse ou não o contexto apresentado, e se isso conflitaria as duas relações.

Nível de reflexão: Bom.

Questão 5 – A3 demonstrou certo ceticismo em relação à utilidade de uma abordagem contextual das teorias científicas. De certa forma, a sua argumentação se aproxima daquela tecida pelos críticos à utilização da história da ciência na educação científica.

Sinceramente não posso dizer com convicção até que ponto a contextualização histórica e cultural das teorias e conceitos científicos pode ser útil ao estudante em seu processo de apreensão do conhecimento, pois dados eventos possuem pontos conflitantes, e não dá para se ter uma ideia de como cada um pode associar estes conhecimentos, sem verificar na prática se isto realmente é possível.

Embora o posicionamento do aluno não fosse o almejado pelo pesquisador, ele evidenciou haver refletido sobre a questão.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

O desempenho de **A3** na categoria foi considerado Bom.

Aluno 4

Questão 2b – O estudante foi muito claro em seu posicionamento frente à visão empírico-indutivista sobre o processo de produção e transformação das ideias científicas.

Não. Pois fica a impressão equivocada de que Copérnico teve a idéia de que a Terra não estava parada, e com essa nova concepção não surge

nenhum problema, coloca-se a Terra em movimento e está tudo resolvido, quando se sabe que não, pois com essa nova concepção surgiram problemas que só foram resolvidos com Newton. E então essa posição de que a Física é uma ciência experimental, totalmente comprovada, não deixa os estudantes refletirem, e entenderem que esses cientistas construíram suas teorias a partir de muitos erros, muitos conflitos, já que estes são seres humanos, sujeitos a erros e a acertos.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 4c – A4 argumentou que a discussão desses problemas suscitaria nos alunos dúvidas e um interesse que provavelmente eles não teriam em uma abordagem tradicional.

É importante abordar esses problemas em sala de aula, porque quando é passado aos alunos a mecânica newtoniana pronta parece a eles muito banal, ou seja não há espaço para uma reflexão, e se for passado aos alunos todos os problemas que se teve com a teoria de Copérnico, eu acredito que aproxima a Física dos alunos, vai estimular nos alunos dúvidas que não surgiriam estudando apenas as ideias de Newton.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 5 – A4 destacou o caráter humano do processo de produção dos conhecimentos científicos.

Sim. Porque muitas vezes o estudante traz consigo concepções erradas sobre determinado conceito físico, que pode ser prejudicial a apreensão do conhecimento científico. E se for passado ao aluno todos os conflitos, e erros que os cientistas tiveram na construção de sua teoria pode ajudar o aluno a compreender o caráter humano do conhecimento científico.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

As reflexões do aluno encontram correspondência em vários autores que defendem o uso didático da história e filosofia da ciência (MARTINS, 2006; DUARTE, 2004).

O desempenho de **A4** na categoria foi considerado Muito Bom.

Aluno 5

Questão 2b – A resposta do estudante foi contraditória. Inicialmente ele parece concordar acriticamente com os relatos históricos empiristas. Todavia, a sua justificativa não condiz com esta concordância.

Sim. Uma concepção indutivista ajuda os estudantes a ter uma compreensão melhor das transformações científicas que ocorreram na época. Com esta concepção os alunos conseguem compreender melhor os cientistas e suas teorias, e daí entendem como se deu a evolução da ciência. Por exemplo: quando em nossas aulas estamos discutindo, na maioria das vezes olhamos para os textos de acordo com as concepções que temos hoje, e isso não nos ajuda a entender o conteúdo. Pois devemos ser indutivistas e olhar para os textos de acordo com cada época e olhar par aquele contexto.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular

Questão 4c – **A5** se mostrou favorável à discussão. A sua argumentação forneceu alguns indícios de reflexão crítica.

É importante para o ensino a compreensão dos problemas que houve na teoria de Copérnico, para que hoje eles entendam as transformações que ocorreram depois de Copérnico e observarem os cientistas que propuseram mudanças.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular

Questão 5 – A argumentação de **A5** forneceu evidências de reflexão crítica e compreensão da questão.

Sim. A história da evolução da ciência é muito importante para a apreensão do conhecimento do estudante, pois pela história o estudante pode compreender as épocas que cada cientista estava e o contexto, e daí pode criticar e enfatizar até que ponto as teorias dos cientistas estavam de acordo, dependendo da época. É fácil para nós falarmos de Newton que é um gênio, mas a sua teoria não veio do acaso, outros cientistas já tiveram ideias que foram reajustadas por Newton até ele formular as suas leis. Ele não partiu do nada.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom

O desempenho do **Aluno 5** na categoria foi considerado Regular.

Aluno 6

Questão 2b – O estudante considerou a concepção empírico indutivista como adequada. Apresentou uma argumentação genérica que não forneceu indícios de reflexão crítica.

Sim, pois devido aos estudos no caso da astronomia e do movimento com observações cada vez mais aprofundadas do Sol, Terra, Lua e movimento dos planetas, junto com teorias existentes, foi permitido, a nós hoje um conhecimento vasto do universo, a sua influência. Através deles hoje sabemos sobre o movimento dos planetas, a órbita, a rotação da Terra que tanto se questionou, e o Sol como centro, também tão questionado.

Ao que parece, o estudante não compreendeu o significado da expressão concepção empírico indutivista.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 4c – Não foi respondida por **A6**.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 5 – O estudante, ainda que de forma genérica, associou à produção dos conhecimentos científicos às demandas da sociedade, o que forneceu alguns indícios de reflexão crítica. Sua argumentação também apresenta problemas de clareza.

Sim, acredito que é importante que para uma grande descoberta, geralmente a sociedade já sentia uma necessidade. Quando se busca a produção de algo, podemos ver que é necessário, ou seja, se os cientistas estão estudando algo, é para aprimorar, ou algo existe, ou algo que precisa para ajudar a sociedade.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

O desempenho de **A6** na Categoria 4 foi considerado Insuficiente.

Aluno 7

Questão 2b – O estudante explicitou com clareza o seu posicionamento frente à concepção empírico-indutivista.

Não permite uma compreensão mais rica. Esse tipo de postura desconsidera o trabalho intelectual do cientista e suas tantas tentativas de encontrar explicação que justifiquem o que pelo menos expliquem o universo. A questão é que ao fazer isso, o cientista ou observa algo muito óbvio ou tinha dotes intelectuais privilegiados o que não confere necessariamente com o que realmente ocorreu na busca dos cientistas por respostas. Estes cometeram e cometem muitos erros, empregam a vida em um trabalho que não dá certeza de que obtiveram a resposta sonhada.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 4c – A7 foi muito claro em sua argumentação.

Sim, pois percebe-se a partir desse estudo que a mecânica e gravitação newtoniana não foi simplesmente uma descoberta, mas sim uma necessidade. Necessidade de uma física nova capaz de um novo modo de observar o mundo.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 5 – A7 destacou a importância da contextualização na desmistificação da imagem do cientista, no reconhecimento do papel do erro no processo de produção do conhecimento, e compreensão do caráter provisório e mutável do conhecimento científico.

Sim. É uma ferramenta importante para diminuir a impressão de que pessoas comuns não são capazes de aprender ciência. Uma imagem que considera, ou permite pensar que os cientistas não tiveram muito esforço para produzir aquele conhecimento [...]. Estudar os erros dos cientistas permite que o aluno veja que errar faz parte do processo, e errar pode significar aprender quando se toma consciência do erro. Estudar como o conhecimento científico é ou foi construído pode direcionar ou apontar o olhar do aluno para que ele tente ver que o conhecimento não é definitivo e muito menos incontestável.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

O desempenho de **A7** na categoria foi considerado Muito Bom.

Comentário sobre o desempenho dos alunos na Categoria 4

As respostas analisadas acima revelaram que dos sete alunos participantes, dois (**A2** e **A6**) não forneceram evidência de que o trabalho de intervenção didática tenha contribuído para a melhoria de sua reflexão sobre o processo de ensino-aprendizagem de física. Os alunos **A3**, **A4** e **A7**, forneceram evidências de que o trabalho de intervenção contribuiu para a melhoria de sua reflexão. Os estudantes **A1** e **A5** também forneceram indícios nesta direção, e obtiveram o nível Regular.

Para o pesquisador, o nível Insuficiente alcançado por **A2** foi uma surpresa, tendo em vista que em várias oportunidades o estudante demonstrou curiosidade sobre a articulação entre a história e a filosofia da ciência e o ensino de ciências.

7.1.2 Considerações sobre a intervenção didática em sua primeira fase: avaliação do desempenho dos estudantes no questionário e análise dos dados advindos da primeira entrevista

O quadro 5 apresenta uma visão geral do desempenho individual dos estudantes em cada categoria de análise e na totalidade das respostas ao questionário. Dentre os sete estudantes participantes da experiência didática, um apresentou um desempenho geral classificado como Insuficiente (**A6**); quatro sinalizaram um desempenho Regular (**A1**, **A2**, **A3** e **A5**) e dois se destacaram dos demais alcançando um desempenho geral considerado Muito Bom (**A4** e **A7**).

A análise das respostas permitiu, em linhas gerais, a identificação de três grupos de estudantes na turma: o primeiro formado pelo aluno que evidenciou desempenho geral Insuficiente (**A6**); o segundo pelos estudantes que alcançaram um desempenho Regular (**A1**, **A2**, **A3** e **A5**) e o terceiro pelos que obtiveram um desempenho considerado Muito Bom (**A4** e **A7**).

Convém salientar, no entanto, que esta classificação não tem um caráter rígido e que esses níveis qualitativos de desempenho obscurecem as singularidades de cada um dos sujeitos que compõe esses grupos. A análise individual do desempenho dos estudantes, em cada uma das categorias, sinalizou algumas diferenças e semelhanças em suas respostas que serão aqui comentadas. Além disso, as observações do professor-pesquisador acrescidas da análise dos dados extraídos das entrevistas forneceram elementos que permitiram uma melhor compreensão desses aspectos.

Quadro 5 - Desempenho dos alunos nas categorias

Aluno	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Desempenho geral
A1	Bom	Regular	Regular	Regular	Regular
A2	Bom	Regular	Muito Bom	Insuficiente	Regular
A3	Insuficiente	Regular	Bom	Bom	Regular
A4	Muito Bom	Muito Bom	Regular	Muito Bom	Muito Bom
A5	Regular	Regular	Bom	Regular	Regular
A6	Regular	Insuficiente	Insuficiente	Insuficiente	Insuficiente
A7	Muito Bom				

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Uma distinção entre os perfis dos sujeitos que convém assinalar, envolve os estudantes **A4** e **A7**; ambos alcançaram um nível de desempenho geral considerado Muito Bom. O estudante **A7**, embora não tivesse realizado leituras específicas sobre o conteúdo desenvolvido na intervenção didática, sinalizou, logo nos primeiros contatos com o professor-pesquisador, ser um bom leitor e possuir uma grande curiosidade em relação aos temas históricos e epistemológicos, além de uma boa capacidade de comunicação nas formas oral e escrita. Além disso, revelou que na disciplina de Estágio Supervisionado I, havia tido uma breve discussão de alguns artigos relacionados à história e a filosofia da ciência. Ao longo da experiência didática, **A7** evidenciou ter adquirido um grande estímulo ao desenvolvimento de suas aptidões.

Em relação ao aluno **A4**, o pesquisador pôde perceber nos sucessivos encontros que, no início da disciplina, a sua participação na discussão dos textos era discreta. Outros estudantes como, **A1**, **A2** e **A3** demonstravam uma participação um pouco mais expressiva. Contudo, durante o desenvolvimento desta primeira unidade da sequência didática o estudante sinalizou, nas discussões em aula, um maior interesse e um sensível melhora na qualidade de seus questionamentos e argumentações. Este crescimento do estudante **A4** foi especialmente gratificante, pois ao se iniciar a disciplina, o seu perfil assemelhava-se àquele sinalizado pelos estudantes classificados como Regular. Os dados advindos da entrevista corroboram esta percepção do professor-pesquisador.

Com relação à análise das respostas ao questionário, foi dito, logo no início do capítulo, que algumas das questões propostas poderiam se ajustar em mais de uma categoria. Em função disso, o cruzamento das respostas de um mesmo aluno, a algumas questões de distintas categorias, evidenciou com mais clareza algumas contradições em seus posicionamentos, ilustrando a presença de noções equivocadas sobre a história e sobre a natureza da ciência, convivendo e conflitando com os conhecimentos históricos e epistemológicos abordados na intervenção.

Assim, na **Questão 1a**, a resposta de **A1** mostrou-se ambígua. O estudante concordou com o conteúdo da citação, mas em sua argumentação sinalizou uma discordância do conteúdo empirista da mesma no que diz respeito à observação; em **1b** o aluno evidenciou um posicionamento anti-empirista em relação ao experimento, reafirmando-o em **2a**. Essas três questões estão na Categoria 1 e em todas **A1** forneceu indícios ou evidências de uma postura de crítica ao empirismo. Ao responder à **Questão 2b** (C4), o estudante ratificou o seu posicionamento anti-empirista, ao discordar do uso dos relatos históricos de cunho empirista no ensino de física.

Nas **Questões 1a e 1b** (C1), **A2** evidenciou uma contradição semelhante à de **A1**, sinalizando também uma crítica à concepção empírico-indutivista. Todavia, ao responder a **Questão 2b** (C4), ele sustentou que os relatos históricos assentados no empirismo poderiam proporcionar aos estudantes uma boa reflexão sobre o processo de construção das ideias e conceitos científicos. O que sinaliza que o aluno não compreendeu bem as diferenças entre os relatos empiristas e os relatos contextualistas. Mais adiante, a boa resposta de **A2** à **Questão 8** (C2) volta a fornecer indícios de que ele tem refletido sobre a história da ciência de uma forma menos simplista do que aquela que evidenciou ao responder à **Questão 2b**.

As contradições apresentadas por **A2**, além de indicar o conflito entre as suas concepções anteriores e as discutidas na intervenção, também revelam problemas no uso da linguagem, na apreensão do vocabulário que aparece nos textos e nas discussões em aula.

O estudante **A3** evidenciou contradição em suas respostas às **Questões 2a** (C1) e **2b** (C4). Na primeira, o aluno se opõe ao empirismo, enquanto que na segunda critica a adesão a um único posicionamento na abordagem histórico-epistemológica, sem perceber que os relatos históricos ancorados no empirismo fornecem uma visão simplificada da complexidade dos processos de produção e transformação dos conceitos e teorias científicas.

Nas **Questões 4a** (C2) e **4c** (C4), também se notam contradições nos argumentos de **A3**. Em **4a**, ele identifica dois problemas apresentados pela teoria de Copérnico: a queda dos corpos em direção ao centro do universo e a não detecção da paralaxe estelar. Ao responder à **Questão 4c** o estudante não estabeleceu nenhum tipo de relação entre a discussão desses problemas e o ensino de física, o que causa certa estranheza, pois estes problemas são de ordem conceitual, e a sua discussão no ensino de física poderia ser justificada mesmo sob uma perspectiva estritamente internalista.

Na **Questão 5** (C4) a argumentação de **A3**, sinalizou um forte ceticismo, em relação ao uso da história da ciência no ensino de física, o que talvez justifique a ausência desse tipo de reflexão na **Questão 4c**, comentada anteriormente. Ao que parece, o estudante não nutre nenhuma simpatia por este tipo de discussão. As conversas informais, antes e após as aulas assim como as observações em aula fornecem indícios nesta direção.

O estudante **A5** na **Questão 2a** (C1) associou à segunda citação uma mensagem empírico-indutivista e opôs-se a ela com uma boa argumentação. Em **2b** (C4), **A5** deveria discutir se os relatos assentados na concepção empírico-indutivista, criticada por ele em **2a**, poderiam proporcionar aos estudantes uma melhor compreensão dos avanços e recuos no processo de construção do conhecimento científico. Aqui o estudante declarou “*Sim*”. Todavia a sua justificativa contradisse este “*Sim*”. A sua argumentação sinalizou um posicionamento anti-indutivista. Parece que o estudante, ainda não assimilou o significado da expressão empírico-indutivista, não a associando, portanto, aos relatos históricos simplificadores do processo de construção do conhecimento científico.

A resposta de **A5** à **Questão 5** (C4), esboçou uma defesa de uma contextualização histórica e cultural no ensino de física e também sinalizou um afastamento de uma compreensão empirista da história pois o mesmo contradisse o seu “*Sim*” na **Questão 2b**.

A contradição de **A5** na **Questão 2b** foi mais uma vez evidenciada na sua resposta satisfatória à **Questão 8** (C2).

A análise das respostas ao questionário forneceu indícios sugestivos de que a experiência didática desenvolvida até aqui, promoveu entre os estudantes **A4** e **A7** uma reflexão crítica e uma melhor compreensão acerca dos aspectos conceituais, históricos e epistemológicos do conhecimento científico priorizados no trabalho de intervenção. Contudo, não seria prudente falar em superação dessas concepções, tendo em vista o tempo didático do trabalho de intervenção,

as suas possíveis lacunas conceituais e metodológicas, assim como, as próprias limitações do questionário aplicado.

Em relação aos alunos **A1**, **A2**, **A3** e **A5**, a avaliação das contribuições do trabalho de intervenção deve ser mais modesta. Contudo, as respostas desses estudantes revelaram indícios de que a experiência didática perturbou, e de certa forma modificou, algumas das concepções prévias que esses alunos tinham sobre a ciência e seu desenvolvimento histórico, levando-os a problematizar essas concepções. Aspectos da natureza da ciência e da construção histórica do conhecimento científico que nunca foram efetivamente refletidos por esses estudantes, passaram a sê-lo.

Quanto ao estudante **A6**, as suas respostas ao questionário revelaram que a qualidade de sua interação com os textos e discussões em sala de aula não foi boa. Assim, não houve evidências contundentes de que a experiência didática tenha modificado de forma significativa as suas concepções prévias, muito embora, em algumas questões, principalmente na Categoria 1, ele tenha sinalizado certo nível de reflexão crítica sobre os tópicos discutidos em sala de aula.

Considerando o conjunto dos estudantes, os dados advindos do questionário sugeriram que, de forma geral, estes se encontravam em um processo de apreensão dos conhecimentos históricos e epistemológicos priorizados na intervenção didática. Este processo parece ter sido marcado por contradições e por certa dificuldade desses alunos para assimilar e integrar ao seu universo cultural o vocabulário atinente aos textos e discussões efetuadas em sala de aula. Alguns deles forneceram indícios de que esses problemas foram reconhecidos e bem enfrentados (**A4** e **A7**); outros sinalizaram esforços neste sentido, ao lado de indícios de incertezas e ambiguidades (**A1**, **A2**, **A3** e **A5**), e no caso específico do aluno **A6** houve poucos indícios de que esse esforço intelectual tenha sido realizado de forma satisfatória.

As ambiguidades e incertezas sinalizadas por uma parcela significativa dos estudantes, assim como o excelente desempenho de uma parcela menor, sugeriram ao professor-pesquisador a necessidade de obter um conhecimento mais detalhado sobre o processo formativo e as singularidades de cada estudante, das escolas por onde passou, da visão sobre o ensino de física que teve no nível médio, da concepção de ciência implícita, ou explicitamente transmitida nas disciplinas do Curso, etc.

Nessa perspectiva, elaborou-se um roteiro básico de temas para as entrevistas que deveriam ser realizadas e que, em linhas gerais, contemplou aspectos como:

- A formação básica do estudante;
- A opção pelo Curso de Física;
- O gosto e o cultivo do hábito de leitura;
- A discussão de textos de natureza histórico-epistemológica em outras disciplinas do Curso;
- A presença ou a ausência de aulas dialógicas nas disciplinas do Curso;
- O posicionamento do estudante sobre as aulas dialógicas;
- A interação com os textos;
- O espaço para a discussão dos conceitos físicos nas disciplinas científicas e as lacunas conceituais do estudante.
- A visão de ciência implicitamente transmitida nas disciplinas do Curso;
- O posicionamento do estudante sobre a articulação das reflexões históricas e epistemológicas ao ensino de física;
- A discussão de algumas respostas contraditórias ou equivocadas no questionário.

Norteadas por este roteiro, as entrevistas se desenvolveram na forma de um diálogo informal entre o professor-pesquisador e o estudante. Convém salientar que este diálogo além de proporcionar um melhor conhecimento do estudante também propiciou a este a oportunidade de, através da linguagem oral, expor o seu posicionamento acerca de alguns aspectos da natureza da ciência e do processo histórico de construção dos conceitos e ideias científicas contemplados no questionário. Em suas argumentações, o aluno forneceu indícios de reflexão crítica e compreensão desses tópicos que não conseguiu evidenciar ou sinalizar no questionário, em função, talvez, das nuances da linguagem escrita. Esses aspectos não foram priorizados no roteiro das entrevistas, mas a argumentação de alguns estudantes espontaneamente fluiu nessa direção, o que foi explorado pelo professor-pesquisador.

A princípio pretendia-se entrevistar todos os estudantes da turma. Contudo, os alunos **A1**, **A4**, **A5** e **A7** demonstraram uma melhor compreensão dos objetivos da entrevista, maior disponibilidade e interesse em participar desta atividade.

A seguir, apresentam-se alguns fragmentos significativos das entrevistas realizadas. Os dados obtidos revelam, a partir da perspectiva do aluno, os problemas reais enfrentados no trabalho de intervenção

didática, assim como, o relativo avanço dos estudantes em direção a uma visão de ciência mais próxima de algumas das reflexões tecidas por historiadores e filósofos da ciência contemporâneos.

Em relação ao ensino de Física no nível médio, o estudante **A1** avaliou que não teve uma boa formação, e apontou um problema que ainda é comum em escolas de diversas regiões do Estado de Mato Grosso do Sul - a formação dos professores:

P. Os teus professores de Física do ensino médio, eram formados em Física?

A1. Não. Acho que eram um Biólogo e um Matemático.

Nesse mesmo item a avaliação de **A4** foi mais amena:

A4. Foi razoável. A Matemática mesmo é que me fez sofrer aqui na Faculdade. Porque Física geralmente é a aplicação matemática. O que foi fraco no meu ensino, que me dificultou na Faculdade, foi o ensino da Matemática.

Ao comentarem os motivos que os conduziram ao Curso de Física, os estudantes em geral mencionaram o fato de se saírem bem nessa disciplina no ensino médio, alguns salientaram que não queriam ficar parados e outros, além desses componentes destacaram a relação candidato-vaga.

P. Por que você escolheu Física?

A1. Física? Até hoje eu me pergunto porque eu escolhi Física, realmente... No ensino médio, mais pela facilidade que eu tinha.

Quando eu terminei o ensino médio, eu não queria parar de estudar, queria continuar, só que eu não tinha ideia de qual curso pegar, como é que era uma faculdade não fazia a mínima ideia.

A4. Eu queria fazer Faculdade e aí eu fiquei com medo de não passar. Eu olhei a concorrência e na época tava nem dois por vaga. Eu gostava de Física também. Eu escolhi pela baixa concorrência, mas também era uma matéria que eu me identificava. Só que eu não sabia realmente o que eu queria na época. Só sabia que eu não

queria ficar parado. Queria estudar alguma coisa, aí pensei: Física.

Um requisito importante para o desenvolvimento do trabalho de intervenção didática e um bom desempenho dos estudantes, era a prática da leitura - um componente indissociável do caráter dialógico e problematizador da proposta didática apresentada. Embora o professor-pesquisador já tivesse clareza de que este seria um problema a enfrentar, o fato de alguns dos alunos refletirem sobre esses hábitos e falarem francamente sobre as suas dificuldades e deficiências na leitura de alguns textos foi extremamente salutar para o professor-pesquisador e para os alunos, repercutindo positivamente na segunda fase da intervenção.

Diante da pergunta direta: você gosta de ler? Surgiram as seguintes respostas:

A1. Eu não considero que eu gosto de ler não. Eu leio por necessidade mesmo, quando precisa ler, aí eu leio.

P. Por prazer?

Não é por prazer não. Por prazer, acho que é ler qualquer coisa interessante. Comigo não. Eu leio quando precisa.

A4. Mais ou menos. Não muito. No ensino médio não tinha muito costume de ler, nunca gostei muito.

P. Atualmente você cultiva o hábito de ler?

Só as coisas da faculdade. E é impressionante, não me sobra tempo, [...] não consigo ler outras coisas.

A5. Gosto professor. Eu leio. Leio bastante.

P. Espontaneamente?

Sim. Gosto de ler jornal, as notícias; gosto de ler os livros daqui, das matérias.

Em relação ao grau de dificuldade dos textos, houve consenso de que estes exigiam um bom esforço de leitura. O estudante **A1** considerou os três primeiros capítulos do Chalmers (1993), usados no início da disciplina de Evolução, os textos mais difíceis, até então: “Do Chalmers cheguei a ler umas três vezes os dois primeiros capítulos”. Em

relação aos textos discutidos na intervenção, comentou que eram complexos, porém mais acessíveis do que os primeiros.

Sobre esta declaração do estudante, é importante considerar que os primeiros textos forneceram subsídios para que os estudantes pudessem interagir de forma mais crítica com os textos utilizados na intervenção. O fato de o estudante ter considerado estes últimos relativamente mais acessíveis, dão um indicativo de que os primeiros o forçaram a uma leitura mais rigorosa.

O estudante **A5**, apesar de ter declarado anteriormente que gostava de ler, salientou a dificuldade que sentia frente às leituras mais sistemáticas como as realizadas na intervenção:

A5. Eu acho que não leio o suficiente, o tanto que eu precisaria. Eu acho que eu leio pouco. Eu tenho muita dificuldade de compreender.

P. Agora esses textos de história da ciência?

É isso aí que eu falo; esses aí eu tenho mais dificuldade.

Um momento importante da entrevista com **A5** se deu quando ele salientou, de forma simples e sincera, a sua prática habitual de leitura acrítica dos textos.

P. Quando você estuda o texto, normalmente você anota as dúvidas, faz questionamentos das afirmações do autor?

A5. Eu acho que eu vou aceitando. Eu vejo que o [...] (**Aluno7**) é diferente.

É importante salientar que a forma de leitura praticada até então por **A5** é um problema que, em maior ou menor intensidade, atinge uma parcela expressiva de estudantes do Curso. É claro que as origens desse problema estão na educação básica. E a sua amplitude transcende o âmbito da disciplina Evolução dos Conceitos de Física. Todavia este é um problema que aflige o aluno real e não pode ser ignorado pelo professor-pesquisador, devendo assim ser levado em conta na análise das possíveis contribuições do trabalho de intervenção didática.

Em relação à discussão de textos relacionados à história ou a filosofia da ciência em outras disciplinas do Curso, os estudantes assinalaram que a única disciplina em que houve algumas discussões desse tipo foi a de Estágio Supervisionado I (oferecida no terceiro ano). Todavia, com exceção do estudante **A7**, que demonstrou certa

familiaridade com algumas dessas discussões, os demais não evidenciaram, ao longo da disciplina de Evolução, terem desenvolvido uma reflexão mais consistente sobre aqueles textos.

Os estudantes também assinalaram que a disciplina de Estágio Supervisionado I foi a única em que o trabalho didático desenvolveu-se pautado pelo diálogo educador-educando, não exatamente nos moldes da proposta didática aqui analisada, mas com certa semelhança.

Ao se posicionarem sobre este tipo de aula, os alunos afirmaram gostar, mas não deixaram de sinalizar algumas ressalvas ou, talvez, resistência.

A1. Eu gostei da forma que ele tava trabalhando ano passado, eu gostei.

Pra mim acho que ainda é mais fácil sim, a aula tradicional mesmo, porque tem conteúdo também que você não consegue explicar.

A4. Aí depende, não sei explicar, mas tem assunto que me interessa mais, então eu leio, discuto mais. Quando eu me interessar mais, acho que é porque eu entendo. Acho que é mais ou menos isso. Quando é um texto que cobra muito assim, está longe da minha compreensão, aí é complicado.

A5. Gostar, professor, eu gosto, mas eu tenho dificuldade de falar. Pode reparar que na maioria das aulas, eu quase não falei nada. Eu não sei se eu sou travado, eu não sei...

Convém salientar que, mesmo quando o estudante sinaliza o gosto pela leitura e simpatia por este tipo de aula, em alguns momentos esta abordagem torna-se inconveniente para ele, em função das múltiplas exigências acadêmicas que precisa atender (o professor-pesquisador percebeu isso em alguns alunos), principalmente no último ano do Curso quando o estudante apresenta o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). O estudante **A7**, que por sinal evidenciou ser um ótimo leitor e participante das aulas, sintetizou muito bem essa situação vivenciada pelos alunos da turma.

A7. As leituras, mesmo que a pessoa goste, elas se tornam um incômodo. Quando vem uma proposta de leitura, ela fala: nossa, mais uma leitura, mais um problema. Uma suposição: apesar da pessoa

gostar da leitura, a situação sobrecarregada de tantas coisas, de tantos afazeres, torna a leitura incômoda.

Esse tipo de proposta, se você não participar da aula e da atividade ela não fisga, ainda mais se você não gostar.

Eu que gosto tem dia que me revolto. Agora pensa alguém que não gosta.

Um item importante da entrevista detinha-se sobre a discussão dos conceitos físicos nas disciplinas científicas, pois ao longo do desenvolvimento da disciplina e da intervenção, o professor pesquisador pôde perceber que algumas das dificuldades associadas à compreensão dos textos e das discussões em aula eram de natureza estritamente conceitual, ligadas à lógica interna da disciplina de Mecânica, oferecida no primeiro ano do Curso.

As declarações dos estudantes forneceram indícios de que, em algumas disciplinas, a despeito da acentuada cobrança de lista de exercícios, a resolução destes não era convenientemente articulada à discussão dos conceitos, teorias e generalizações simbólicas; ao que parece esta atividade não era valorizada e explorada pelos professores, ainda que de forma incipiente e intuitiva, reduzindo assim à resolução de exercícios a uma atividade mecânica.

O estudante **A1** sinalizou que no 1º ano, na disciplina de Mecânica, houve certo espaço para a discussão dos conceitos. As provas, explicitamente, não continham questões conceituais, apenas problemas, mas o professor procurava saber como o aluno chegara a determinado resultado:

A1. Eu lembro que a gente fazia as contas e tinha itens que o professor procurava fazer com que a gente explicasse, como é que chegou naquele determinado resultado, o que isso significava.

Mais adiante **A1** declarou que nos anos seguintes, nas demais disciplinas este tipo de discussão já não ocorria: “Aí a partir do segundo a gente fazia as contas normal assim”. O estudante assinalou como exceção, a disciplina de Mecânica dos Fluidos, quando ele a cursou pela segunda vez, com outro professor.

Para o estudante **A5**, alguns professores não se detiveram sobre a discussão dos conceitos: “É mais uma aplicação. Tem uns professores

que explicam muito o conceito mesmo, mas tem uns que partem mais para a aplicação”.

No âmbito dessa discussão, alguns estudantes explicitaram certas lacunas conceituais na sua formação científica. Uma delas relacionava-se diretamente com o tema desta primeira unidade da intervenção didática – a gravitação newtoniana.

Os estudantes **A1**, **A4**, **A5** e **A7** revelaram que não haviam estudado o conteúdo de gravitação universal, um tópico que consta na ementa da disciplina de Mecânica, oferecida no primeiro ano. Alguns fragmentos explicitados a seguir dão uma melhor dimensão do problema:

P. Você não viu a gravitação? Não estudou gravitação?

A1. No primeiro ano, não.

Vimos até a teoria do corpo rígido, aí paramos, centro de massa, essas coisas.

A5. Gravitação?

Não professor.

P. Você sabia essa questão da ação à distância?

Não, é tudo novo.

P. Você chegou a estudar alguma coisa de gravitação universal?

A7. Não. Nada, nem na escola.

P. Quando foi a primeira vez que você ouviu falar em leis de Kepler?

Este ano. Na disciplina de evolução. Lei de Kepler? Kepler para mim sempre foi uma incógnita.

P. E Copérnico? Nunca houve uma abordagem?

Nada. O que eu sabia: que Galileu tinha desenvolvido alguma coisa que Newton, eu sabia daqueles livros texto pra ler, que o Newton, apoiado nos ombros de gigantes... isso aí. Nunca entendia onde é que Kepler ficava na história.

Conforme se pôde perceber, alguns estudantes evidenciaram essas lacunas conceituais em suas respostas ao questionário. Além disso, a presença dessas lacunas causou em alguns alunos o receio da pergunta, da dúvida, como revelou o estudante **A5**:

A5. Às vezes eu tenho umas questões, as minhas dúvidas, não sei se é mais, da formação assim, [...] da teoria. E não da sua matéria [...]. Às vezes a minha (dúvida) é bem mais relacionada.

É. Específica.

P. Você acha que as lacunas às vezes atrapalham a qualidade da tua interação com o texto?

A5. Às vezes sim, porque às vezes tem uma coisa lá que eu não entendi, não compreendi, aí eu não sei se eu fico fazendo essas perguntas específicas para o senhor lá na sala?

Em relação ao uso da história da ciência no ensino de física - um item contemplado na Categoria 4 do questionário - os estudantes se mostraram favoráveis. Suas argumentações fornecerem indícios de que, apesar das dificuldades que estavam encontrando na intervenção, o trabalho didático desenvolvido até então, lhes ofereceu subsídios para que começassem a refletir sobre a história e a filosofia da ciência como um possível instrumento de ação didático- pedagógica.

O estudante **A1**, ao justificar a importância de se discutir no ensino médio, ainda que minimamente, as principais críticas de natureza científica feitas à teoria de Copérnico, citou a sua própria experiência como aluno da disciplina: “Acho que sim. Tanto é que senti falta na minha formação, até agora ninguém tinha abordado, quando cheguei a fazer a mecânica, a gravitação”.

O professor-pesquisador perguntou então ao estudante por que ele não havia respondido à **Questão 2b**, que abordava justamente isso? O estudante declarou que não havia compreendido a palavra relevância. O que evidencia uma carência de vocabulário.

Diante da pergunta: Você acha que alguns tópicos da história da ciência poderiam ou deveriam ser levados para o ensino médio? Os estudantes **A4** e **A5** teceram as seguintes considerações:

A4. Eu acho que deveriam. Eu acho que fica tão... não sei dizer a palavra certa, fora da realidade, você simplesmente chega e joga aquele conceito e aí fica tão óbvio para o aluno que parece que não surgem as dúvidas dele. Eles não param para refletir, porque parece até uma coisa meio sem nexos. Chega lá agora vou dar Lei de Newton, aí começa, força: $F=m.a$, né. Aí pronto. Eu acho que vai tornar a matéria até mais interessante para os alunos.

A5. Eu acho importante. O aluno vai conhecer mais a ciência, porque a maioria não gosta. Ele vai poder gostar e interagir mais. Porque, no meu ensino médio, a minha física foi só continha, não tinha nada de ver o conceito, era só aquilo, a massa é isso, a lei de Newton é isso e já aplicar nas continhas. Foi uma matéria muito mecanicista mesmo.

Eu acho. O professor, uma vez leu um texto de Newton lá sobre a maçã, que a história da maçã era falsa. No ensino médio, a gente só aprende que aconteceu isso né? Que houve uma verdade que caiu na cabeça de Newton, a gente aprende isso, não é? Eu acho importante pegar aquele artigo ou pegar um artigo relacionado e mostrar que não foi assim que aconteceu, para os alunos do ensino médio. Eu separei já esse artigo pra quando você dar aula para a gente mostrar que não foi isso o que aconteceu mesmo.

As argumentações de **A4** e **A5** sugerem que o uso da história da ciência no ensino de física, poderia contribuir para a clarificação dos conceitos científicos e generalizações simbólicas; tornar os conteúdos científicos mais interessantes e desmistificar o cientista.

Percebe-se aqui uma similaridade entre os argumentos apresentados por esses estudantes e aqueles tecidos pelos pesquisadores favoráveis ao uso da história da ciência no ensino de ciências.

O estudante **A7** após assinalar ter compreendido que a teoria de Copérnico exigia a construção de uma nova física foi questionado sobre a importância de se discutir os problemas científicos dessa teoria no ensino de física. Sua resposta foi curta e sinalizou que esse tipo de discussão, para ele, é também uma questão de valor: “É Importante, porque eu acho que o aluno tem direito de saber o que aconteceu”.

A seguir apontou a relevância da abordagem contextual para a crítica da visão algorítmica do método científico transmitida no ensino de ensino de física, em sintonia com vários pesquisadores em ensino de ciências.

A7. A abordagem do método científico, aquela visão de uma receita pronta para o cientista seguir e fazer... Eu acho muito empregado na aula e nos

livros didáticos das escolas, eu acho isso um problema.

Os estudantes não deixaram de apontar alguns problemas e dificuldades relacionadas ao uso história da ciência no ensino de física em nível médio, tais como: a capacitação do professor, o tipo de história da ciência que deve ser levado ao ensino e as pressões do sistema escolar sobre o professor:

A4. Acho que exige um certo conhecimento do profissional que vai estar tratando isso, porque vai acabar sendo que nem o professor colocou, vai que a gente resolve dar a História da Ciência da maneira empirista. Contada da maneira empirista, entende?

Acho assim, uma abordagem que aproxime mais os grandes pensadores da gente mesmo, porque pelo menos a gente tem uma visão assim de que eles estão num patamar. Claro, são pessoas acima mesmo, mas parece assim que não é nem gente como a gente. Não é? Dá a impressão.

A5. O problema que eu acho no ensino médio é o tempo. Eu não sei como que é agora, não sei se é 3 aulas e a escola cobra de você um cronograma, tem lá as matérias, já vem até aquele caderninho do governo que você tem que dar né. Eu acho que é o tempo complicado.

Em relação ao uso da história da ciência nas disciplinas científicas do Curso de Física, a argumentação do estudante **A4** foi lapidar, revelando um espírito crítico, que surpreendeu o professor-pesquisador:

P. Nas disciplinas científicas do curso, houve espaço para discussão conceitual, discussão de temas históricos em alguma disciplina?

A4. Não que eu me lembre.

P. E você acha que seria interessante ter alguns momentos para isso?

Acho que sim. Porque às vezes a gente perde tanto tempo resolvendo exercícios, sabe aquela visão conteudista que tem que passar sei lá quantos conteúdos, e às vezes não seria tão proveitoso quanto pegar um tempo da aula para discutir a

parte histórica, eu acho que até mesmo os professores que estão dando aula pra gente, não estão preparados para discutir essa parte histórica... eu imagino.

Os depoimentos dos estudantes forneceram indícios de reflexão crítica ou compreensão sobre os aspectos conceituais, históricos e epistemológicos contemplados nas outras categorias estabelecidas para a análise das respostas ao questionário.

Em relação à concepção empírico-indutivista, todos os estudantes sinalizaram que, ao longo do ensino médio e na maior parte das disciplinas do Curso, esta concepção foi sistematicamente reforçada.

P. E no ensino médio tu achas que, de algum modo esta concepção, estava implícita lá?

A4. Com certeza. Eu acho que no ensino médio nem tinha espaço pra gente pensar que pra nós, pelo menos pra mim a ciência era aquilo e sem discussão entende? Era aquilo pronto e acabado, no ensino médio na minha visão, não tinha nenhum espaço para a reflexão de nada dos cientistas terem sofrido, como a gente pensou assim, sabe na época deles? Nem tinha espaço para isso no ensino médio. E na Faculdade, eu comecei a ver isso agora apenas na disciplina de evolução, comecei a pensar a esse respeito.

P. Esta posição empirista foi reforçada na graduação?

Eu acho que foi porque eu não vi tanta diferença assim do ensino médio para a Faculdade nesta visão de história da ciência. Eu acho que continua na mesma linha, só vendo a parte que nos interessava aprender naquele momento, a parte do conteúdo mesmo, sem estar refletindo mais nada.

Para o estudante **A5** a postura dos físicos teóricos do Curso parece ser mais flexível frente à concepção empirista:

P. Você acha que essa posição foi reforçada nas disciplinas científicas?

A5. É, foi. Do experimento surge isso né? Só que a gente vê que não é.

[...] A maioria falava que “isso surgiu da experiência tal”.

P. Essa postura empirista é forte no curso, na física, entre os físicos?

Pelo menos entre os mais assim, sem ser os teóricos, acho que é forte.

P. Você acha que os físicos teóricos são um pouco mais flexíveis?

São, que tem uma teoria, surge uma teoria para tal experimento. Já tem uma teoria embasada, não surge do nada né. A experiência não surge do nada.

O aluno **A7** destacou de forma incisiva a presença da concepção empirista na formação do estudante:

A7. A gente aprende assim, eu acho que aprende assim. Não é uma questão dos alunos pensarem, eles aprendem assim. É passado para eles isso, eu acho.

P. Deste jeito?

Os dados experimentais são imperadores.

Os estudantes assinalaram que antes da disciplina, Evolução dos Conceitos de Física, o único espaço em que houve algum questionamento aos preceitos de cunho empírico-indutivista se deu na disciplina de Estágio Supervisionado I.

P. E na disciplina de Estágio, você chegou a pensar isso? Parece que foi uma disciplina que teve uma pequena aproximação.

A4. Teve. Só que na disciplina de estágio a gente ficou mais nos referenciais teóricos mesmo (os principais teóricos da aprendizagem). Não partindo para essa linha de discussão.

As declarações dos alunos deram indicativos de que o trabalho de intervenção didática contribuiu para um relativo enfraquecimento da concepção empirista que, segundo declarou **A7** em uma das aulas, “encontra-se arraigada no espírito”; mas, como assinalou **A1** na entrevista “Não está mais forte, mas existe ainda”. Para o estudante **A5** o trabalho de intervenção:

A5. Contribuiu, porque, eu não pensava muito com relação a isso não.

P. Essa postura, ela ainda é forte em você? Como é que você avalia?

Eu acho que ela já está quase morrendo. Eu acho que é o correto que, tudo surge da teoria. Não surge basicamente da experiência, do experimento como é colocado.

Bem, os dados obtidos até aqui não permitem afirmar que essa concepção “está quase morrendo”, como declarou **A5**, mas sugerem que os estudantes, de distintas maneiras, a estão problematizando e esboçando mudanças em direção a uma melhor compreensão acerca dos limites da concepção empírico-indutivista, em especial, a sua forma de conceber a relação teoria-observação/experimento – um aspecto da natureza da ciência contemplado na Categoria 1.

Os estudantes ao serem questionados acerca de algumas respostas contraditórias, equivocadas ou omissas no questionário, forneceram, em suas argumentações, elementos adicionais para a compreensão de suas dificuldades de leitura e interpretação, a carência de vocabulário, e o modo como estão refletindo a ciência e os conceitos científicos, em uma perspectiva histórico-epistemológica.

Por exemplo, a primeira citação que aparece no questionário exigia, nas **Questões 1a e 1b**, a identificação da concepção epistemológica implícita na mensagem do autor e o posicionamento crítico do estudante em face dessa concepção. Conforme se evidenciou na análise do questionário, em geral, as respostas em **1a** foram contraditórias, o que não se verificou em **1b**. Essa questão foi explicitamente retomada com **A1** e **A5** e rapidamente abordada com **A4** e **A7**.

A justificativa de **A1** para a sua resposta em **1a** sugere certa dificuldade para compreender o papel dos pressupostos teóricos na observação. No entanto, a sua justificativa para a resposta em **1b** sinaliza que em relação à experimentação, a compreensão do papel dos pressupostos teóricos tem sido mais tranquila: “A carga teórica que já vinha sendo formulada, está contida em seus dados experimentais”.

Um fator que pode ter contribuído para que o estudante evidenciasse esta contradição, talvez tenha sido o grau de elaboração e o estilo persuasivo da primeira citação. Esta evidencia uma perfeita sintonia com a visão empirista transmitida nas disciplinas científicas. Dessa forma, frente a uma citação mais refinada, o estudante recorre espontaneamente ao conforto da concepção empirista. Pois, até mesmo muitos professores e cientistas compartilham desta concepção.

Ao analisar a **Questão 2a**, o estudante **A1** confirmou o posicionamento anti-empirista evidenciado no questionário. Só depois de algum tempo de conversa, o estudante analisou as duas citações e conseguiu perceber que ambas eram semelhantes. Isto sinaliza que a habilidade de leitura foi um fator importante para a qualidade das repostas ao questionário.

O estudante **A5**, ao analisar a **Questão 1a** ratificou o posicionamento sinalizado no questionário, ao assinalar com maior clareza a sua compreensão sobre o papel dos pressupostos teóricos nas observações telescópicas de Galileu: “[...] Tinha os teóricos antecessores a ele, ele já tinha uma ideia pré-concebida. Os dados não surgem do nada. Ele não trata só como dados mesmo. Eu acho que tem alguma coisa por trás”.

Em relação à **Questão 1b**, onde equivocadamente respondeu que Galileu não havia feito experimentos, **A5** esclareceu que havia faltado ao encontro em que o texto sobre Galileu foi discutido e que o havia lido parcialmente: “Na prova eu coloquei assim, como que ele nunca fez experimento. E aí depois eu vi que era só da torre de Pisa”.

Em suma, nem todos os textos foram lidos pelos estudantes, fato que também foi evidenciado por **A1** e **A4**, nas entrevistas, e sinalizado por **A2**, **A3** e **A6**, em alguns encontros.

Ao reler a segunda citação e compará-la com a primeira, **A5** logo percebeu a semelhança entre ambas. Após esclarecer o que entendia por concepção indutivista, o estudante foi solicitado a expor o seu posicionamento sobre o uso dos relatos históricos empírico-indutivistas no ensino de física. Era essa a **Questão 2b** do questionário. A resposta oral de **A5** revelou-se mais clara do que a escrita. Eis a sua argumentação:

A5. Não. Porque nessa posição a teoria surge da experiência do experimento e não dos pressupostos, que nem aqui.

E ela não permite refletir sobre os erros, avanços, porque ela (a teoria) surge única e exclusivamente do experimento, então aquilo ali é dado como verdade, surge dali, então eu não vou ter... ninguém vai falar sobre erro de cientista.

A **Questão 3a** foi retomada com **A1** e analisada por ele durante um bom tempo. Contudo não houve indícios de uma compreensão da questão proposta mais elaborada do que a apresentada no questionário.

O estudante não percebeu a diferença entre os enfoques distintos da teoria de Copérnico, dados por Galileu e pela Igreja.

É interessante assinalar que o próprio texto ao qual a **Questão 3a** se refere contém a resposta: “a Igreja usava a teoria de Copérnico como instrumento de cálculo”, ao contrário de Galileu que lhe atribuía uma realidade física. Apenas os estudantes **A4** e **A7** evidenciaram uma clara compreensão dessa diferença de enfoque. O que sinaliza, mais uma vez, que a habilidade de leitura e interpretação de texto, de forma geral, não foi convenientemente desenvolvida nas disciplinas do Curso.

No questionário, a resposta de **A5** à **Questão 3a** foi semelhante à apresentada por **A1**. Mas na entrevista, após reexaminar a **Questão, A5** forneceu indícios de um avanço em sua compreensão:

A5. A Igreja, antes ela usava a teoria de Copérnico somente para os cálculos, para dar certo os cálculos lá, só que ela não aceitava; na ideia dela o sol gira em torno da Terra.

Conforme foi salientado anteriormente, a **Questão 4a** era de natureza predominantemente conceitual, contudo, uma parcela expressiva da turma não a respondeu. Aqui, ao que parece, houve a combinação das lacunas conceituais dos estudantes com uma interação superficial com alguns textos discutidos nas aulas.

O estudante **A4** ao expor o seu posicionamento sobre o papel dos pressupostos teóricos e filosóficos na observação, aludiu à influência das ideias aristotélicas à época de Tycho Brahe, quando este observou uma nova estrela.

P. As ideias do contexto histórico-cultural podem, de algum modo, influenciar a produção científica de um pensador?

A4. Podem, tanto é que a gente não leu um texto em que tinha um pessoal que era seguidor de Aristóteles e aí que não via mudanças no céu, lembra? Eu acho que aí tinha um pessoal de uma outra região, que eu não sei se não era seguidor de Aristóteles, eu não lembro muito bem, mas eu sei que apareceu uma estrela diferente. Esse pessoal seguidor ali, daquela cultura, para eles não tinha aparecido a estrela.

Eu lembro que eu li alguma coisa, que aí uns pensadores de uma outra região que não tinha

aquela cultura tão enraizada, já tinham notado que estava tendo mudanças no céu. Teve um texto desse, não teve ?

No trecho acima o estudante está se referindo a uma passagem de Kuhn (1996), citada em um dos artigos usados na intervenção (PRAXEDES; PEDUZZI, 2009). Essa declaração de **A4** aponta para a compreensão da interdependência teoria-observação (C1) e também para a historicidade da ciência (C2).

Em outro momento da entrevista **A4** fornece novos indícios de crítica à concepção empírico-indutivista:

P. Os valores, as expectativas dos cientistas, de certo modo, são colocados no seu trabalho?

A4. São sim, porque ninguém vai pensar assim, como a gente falou dos experimentos né. Ninguém vai pro laboratório sem saber que já tem alguma coisa. [...] já está esperando alguma coisa com aquele experimento, ninguém vai lá sem nada, vou fazer um experimento para ver o que é que dá. Imagina as tantas possibilidades que tem de resultar com aquele experimento.

A compreensão da historicidade da ciência (C2), assim como do caráter mutável e provisório do conhecimento científico (C3) são evidenciados por **A4** na argumentação abaixo:

P. A física pode ser interpretada como, não apenas a física, como uma produção cultural, produção humana?

A4. Sim, com todas as suas transformações, com todas as suas evoluções possíveis, né, com todos os erros porque o cientista pode errar. Na verdade, conhecimento científico, não é conhecimento pronto provado né? Muitas vezes é um... uma, são... são... (tenta lembrar a palavra).

São seres humanos que estão fazendo; então são seres humanos sujeitos a erros.

A retomada de perguntas do questionário com o aluno **A7**, em linhas gerais, confirmou tudo o que ele expôs por escrito, de forma que, muitas de suas respostas não precisaram ser exploradas. Contudo algumas das declarações do estudante merecem ser destacadas.

Ao se referir à primeira citação que aparece no questionário, o estudante a considerou clara e em sintonia com o que aprendera nas disciplinas científicas do Curso:

A7. Eu aprendi que Galileu viu os dados e que formulou a lei. Não que ele já tinha uma teoria antes.

Eu aprendi o inverso do que eu respondi. Isso aqui eu aprendi agora.

P. Na disciplina? (de Evolução)

A7. Na disciplina.

Sobre o conteúdo empirista implícito nas duas primeiras citações, **A7** reafirmou que, a seu juízo, essa posição foi reforçada nas disciplinas do Curso: “Exceto aquelas que têm uma postura na sua ementa de tratar da questão reflexiva, as outras reforçam”.

Em relação à **Questão 2b**, que perguntava se a visão epistemológica implícita nas duas citações proporcionava ao estudante uma visão adequada das transformações científicas, o posicionamento de **A7** foi curto e incisivo: “Ué, não. Por quê? Porque ela é falsa. Ela não condiz com a prática do Galileu, com a prática dos outros cientistas”. No entanto apesar desta resposta enfática, **A7** admitiu que a presença da concepção empírico-indutivista é muito forte na formação de todos os estudantes, incluindo-se entre eles.

Em relação à prática da leitura e às discussões em sala, **A7** assinalou que as aulas ajudam, mas que a leitura é fundamental, sintetizando metaforicamente que “leitura de ônibus não resolve”. Apontou também algumas demandas acadêmicas da turma, que, de certa forma, podem ter comprometido o desempenho de alguns de seus pares.

A7. Eu vou explicar a situação que a sala está vivendo. Tem pessoas que estão precisando se dedicar em outros aspectos das disciplinas e dos projetos sabe? E na hora em que você se depara, você tem que fazer uma escolha e é isso o que está acontecendo. Então o resultado das provas é que em outras disciplinas está sendo exigido uma outra escolha.

Assim, os dados obtidos com as entrevistas, de fato, propiciaram um conhecimento mais detalhado do perfil dos alunos, das lacunas conceituais nas disciplinas científicas; das deficiências na formação em

geral e das múltiplas obrigações acadêmicas a que estão submetidos. Enfim, uma série de problemas que dificultam - mas não impedem - a participação do estudante em uma proposta didática dialógica e problematizadora que, em essência lhe exige a prática da leitura sistemática de textos que lhes são apresentados com uma visão de ciência totalmente distinta da que vinha sendo assimilada até então; e a assunção da postura de sujeito do conhecimento. Esta nova postura discente o obriga a abandonar a situação relativamente confortável das aulas expositivas tradicionais, centradas unicamente na figura do professor.

Apesar dessas dificuldades, os dados advindos das respostas ao questionário e das entrevistas forneceram indícios de que o trabalho de intervenção didática, até aqui desenvolvido, dentro de seus principais objetivos, de certo modo, contribuiu para que os estudantes desenvolvessem uma reflexão crítica e uma melhor compreensão sobre a física e a evolução de seus conceitos, sob uma perspectiva histórico-epistemológica.

Esses dados permitiram ainda, ao professor-pesquisador, reavaliar alguns procedimentos e expectativas integrando-os ao delineamento e à implementação de uma nova unidade didática – a gravitação einsteiniana.

7.2 ANÁLISE DA INTERVENÇÃO DIDÁTICA EM SUA SEGUNDA FASE

Ao final da segunda unidade didática, os alunos responderam a um questionário. Como na primeira fase, este também fez parte de uma das formas de avaliação formal da disciplina foi respondido sem consulta.

A análise das respostas dos estudantes ao segundo questionário teve como objetivo avaliar em que medida a intervenção didática nesta segunda fase contribuiu para o desenvolvimento entre os alunos de uma reflexão crítica ou uma melhor compreensão de aspectos relacionados à evolução dos conceitos físicos e à natureza da ciência, priorizados na intervenção didática. Dessa forma, seguindo o mesmo critério adotado no primeiro, as questões apresentadas e as respectivas respostas dos alunos foram reunidas em quatro categorias de análise:

C1 – A interdependência entre observação e teoria, ou entre experimento e teoria;

C2 – A historicidade da ciência – Esta categoria diz respeito às múltiplas dimensões da ciência (intrínseca, filosófica, cultural e histórica) e, portanto, a interação entre a ciência e o contexto sócio-histórico, na qual se insere a influência recíproca entre ciência e tecnologia.

C3 – O caráter provisório, mutável e inventivo do conhecimento científico – as leis, teorias e conceitos científicos como produções do intelecto humano, balizadas pelo diálogo crítico e criativo com a natureza.

C4 – Contribuições da intervenção didática para a reflexão do aluno sobre o potencial educativo da história e filosofia da ciência no ensino de física.

Em relação à validação do segundo questionário, deve-se salientar que esta seguiu os mesmos procedimentos efetuados no primeiro e envolveu os mesmos sujeitos. Desta forma, este processo não será aqui descrito.

O questionário aplicado

As questões apresentadas contemplaram basicamente as linhas gerais da gênese da gravitação einsteiniana. A seguir, apresenta-se o questionário.

Evolução dos Conceitos de Física

4º ano matutino

Nome: _____

Data: _____ **Matrícula** _____

Orientação geral para o estudante:

Leia atentamente as questões abaixo. Ao responder a cada uma delas, procure justificar a sua resposta, apresentando sempre que possível um exemplo que ilustre a sua argumentação.

1.

A teoria da relatividade restrita pode ser considerada... essencialmente uma generalização a partir do experimento de Michelson [...] Descartando todas as concepções a priori sobre a natureza da realidade [...] Einstein tomou como ponto de partida fatos experimentais

cuidadosamente testados [...] independentemente deles parecerem no momento razoáveis ou não. [...] Assim nasceu a teoria da relatividade restrita.

A teoria einsteiniana depende inteiramente do resultado da experiência de Michelson e pode ser derivada dele.

Que concepção epistemológica pode ser identificada nas citações acima? Qual o seu posicionamento em relação a esta concepção? Comente.

2. Que problema ou questão foi o principal norteador de Einstein no desenvolvimento da **teoria da relatividade especial**? Cite algumas das mudanças conceituais acarretadas por esta teoria.

3. Que problema ou questão foi o principal norteador de Einstein no desenvolvimento da **teoria da relatividade geral**? Cite algumas das mudanças conceituais acarretadas por esta teoria.

4. Em linhas gerais, em que consiste o princípio de equivalência? Einstein chegou a este princípio a partir de experimentos cuidadosamente realizados? Justifique a sua resposta.

5. A física contemporânea, tanto na escala subatômica quanto na astronômica, faz uso de sofisticados equipamentos de 'observação experimental e mensuração'. Desta forma:

a) Pode-se afirmar que a relação teoria-observação/experimento se dá nos moldes preconizados pela concepção empírico-indutivista? Comente.

b) Aponte uma característica da ciência contemporânea e a confronte com algumas das ideias presentes no ensino de física em diferentes níveis de ensino.

6. Tendo como referência os estudos realizados na disciplina Evolução dos Conceitos de Física, é possível afirmar que, de certo modo, a teoria da relatividade geral mudou a forma dos físicos e astrônomos observarem o universo? Comente e dê um exemplo, para ilustrar a sua argumentação.

7. A física contemporânea tem como pilares duas grandes teorias que explicam os fenômenos que ocorrem em diferentes escalas do universo,

configurando a existência de “dois mundos” regidos por duas físicas diferentes.

a) Que mundos são esses?

b) Que teorias são essas? E, em linhas gerais, por que ocorre esta cisão.

c) Ao longo da história da ciência ocidental podemos afirmar que, de certo modo, a ciência já enfrentou uma dicotomia semelhante. Comente?

8. Em livros e documentários de divulgação científica, muitas vezes encontramos expressões como: “Galileu, Newton e Einstein foram cientistas que estavam muito à frente de seu tempo”. Tendo como referência os estudos realizados na disciplina Evolução dos Conceitos de Física, discuta o conteúdo deste tipo de expressão e suas possíveis implicações no ensino de física.

9. Tendo como referência os estudos realizados na disciplina Evolução dos Conceitos de Física, comente alguns cuidados que se deve ter ao utilizar documentários de divulgação científica como recurso didático em aula.

*****.

7.2.1 Análise do desempenho dos alunos no segundo questionário

Inicialmente, a análise se deterá sobre o desenvolvimento individual dos estudantes em cada categoria. Em um segundo momento, fazendo uso também da análise dos dados advindos das entrevistas, serão feitas algumas considerações sobre o desempenho dos estudantes e o alcance da intervenção didática nesta unidade.

Categoria 1 – A interdependência entre observação e teoria, ou entre experimento e teoria

Na Categoria 1 foram colocadas as **Questões: 1, 5a e 6**. Os resultados alcançados por cada estudante estão sintetizados no quadro 6. Neste quadro percebe-se que 7 sete participantes, 2 evidenciaram um desempenho Insuficiente (**A1 e A6**) Os demais tiveram um desempenho, a primeira vista, satisfatório, apresentando os seguintes níveis: Regular (**A2, A3 e A5**); e Muito Bom (**A4 e A7**).

Uma observação ligeira deste quadro já revela uma característica singular do grupo formado pelos alunos **A2, A3 e A5**, o desempenho flutuante – do Insuficiente ao Muito Bom - ao longo das questões que compõe a categoria. Essa característica foi identificada em outras

categorias tendo se evidenciado também nas respostas ao primeiro questionário. Após o quadro 6, apresenta-se a análise das respostas de cada aluno.

Quadro 6 - Resultados obtidos na Categoria 1(Interdependência entre teoria e observação e entre teoria e experimento)

Aluno	Questão 1	Questão 5a	Questão 6	Desempenho na categoria
A1	Insuficiente	Insuficiente	Muito Bom	Insuficiente
A2	Muito Bom	Insuficiente	Bom	Regular
A3	Bom	Regular	Regular	Regular
A4	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
A5	Muito Bom	Regular	Muito Bom	Bom
A6	Insuficiente	Insuficiente	Insuficiente	Insuficiente
A7	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Aluno 1

Ao longo das três questões pertinentes à categoria o estudante teve um desempenho irregular, não fornecendo nas **Questões 1 e 5a** indícios de reflexão crítica ou compreensão diretamente relacionados a estas questões. No entanto, ao responder à **Questão 6** o estudante evidenciou um bom nível de reflexão crítica.

Questão 1 - O estudante não compreendeu a questão.

A questão epistemológica seria a existência do ÉTER, a pois naquela época pensava-se que o vento desse ÉTER influenciaria nos resultados das medições da velocidade da luz, o que não aconteceu após os experimentos. Anos mais tarde, Einstein assumiu em sua teoria a não existência do ÉTER. Para ele a velocidade da luz era constante.

O equívoco do estudante parece sinalizar que ele ainda não tem uma compreensão clara do termo epistemologia e das expressões a ele

associadas. É interessante observar que esta expressão, apareceu diversas vezes nas discussões efetuadas em sala de aula, assim como nos textos utilizados, todavia, ao que parece, não foi assimilada e integrada ao universo cultural do educando.

Nível de reflexão crítica: Insuficiente.

Questão 5a – Não foi respondida pelo estudante.

Nível de reflexão crítica: Insuficiente.

Questão 6 - A argumentação de **A1** evidencia reflexão crítica boa compreensão da influência da teoria sobre o trabalho de observação/experimento.

Sim. Por exemplo, a teoria da relatividade geral de Einstein fez previsões sobre a curvatura da luz, e os cientistas ao tentarem medir esse desvio conseguiram realmente observar esse fato. Mas se os mesmo cientistas tivessem tentado verificar essa medida em 1900 isso não seria possível.

É interessante observar que embora o estudante, sinalize não conhecer o significado explícito do termo, concepção epistemológica a sua argumentação na última questão, sugere que implicitamente ele está refletindo sobre isto.

Nível de reflexão crítica: Muito Bom.

Aluno 2

Questão 1 – O estudante expôs com clareza a sua refutação à concepção empírico-indutivista e aos relatos históricos a ela associado, sintetizado em ambas as citações.

Concepção empirista, ou seja, parte da experiência, mas Einstein não usou da experiência para resolver o conflito entre o eletromagnetismo e a mecânica clássica. Einstein levantou hipótese e construiu sua teoria sobre essas hipóteses.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 5a – A reflexão de **A2** não forneceu indícios de reflexão crítica.

Não. Hoje pode-se citar diversos conflitos entre a aceleração de partículas atual e os equipamentos construídos no passado.

Nível de reflexão crítica: Insuficiente.

Questão 6 – A resposta de **A2** foi curta, porém forneceu evidências de reflexão crítica ou compreensão acerca do papel norteador das teorias no estudo do Universo.

Sim. Pois através da teoria da relatividade geral desvendou um mistério não solucionado por Newton sobre a gravidade.

Nível de reflexão crítica: Bom.

Como se pôde perceber o estudante evidenciou nas **Questões 1 e 6** uma compreensão da relação teoria-observação/experimento que o distancia do empirismo-indutivismo. Todavia na **Questão 5a** ele não foi capaz de articular esta compreensão à dinâmica da ciência contemporânea sinalizando em sua curta argumentação uma visão de ciência tradicional, mais próxima do empirismo-indutivismo.

Aluno 3

Questão 1 – O estudante rejeitou de forma clara o relato sintetizado em ambas as citações. Todavia, a sua resposta foi incompleta, pois ele não identificou a concepção epistemológica implícita nos trechos citados.

Einstein desenvolveu sua teoria independentemente dos experimentos realizados por Michelson, apesar destes através de seus resultados negativos confirmarem as previsões teóricas de Einstein. Diante deste fato é que muitos pensavam, acreditavam que suas teorias tinham como embasamento os experimentos realizados por Michelson.

É interessante observar que o estudante evidenciou um bom diálogo com os textos, no que diz respeito à rejeição do resultado dos experimentos de Michelson-Morley como base para a teoria da

relatividade especial. Todavia, ele não associou a defesa desse enfoque a uma concepção empírico-indutivista.

Nível de reflexão crítica ou compreensão. Bom.

Questão 5a – A resposta de **A3** foi ambígua. Inicialmente o aluno defende a concepção empirista, afirmando que Einstein e Newton “*trabalhavam de certa forma arraigados nessa visão empírico-indutivista*”. Ao final de sua resposta o estudante salienta que “*Einstein não realizou experimentos ao desenvolver a sua teoria, apesar de sugeri-los...*”.

Tanto Einstein quanto Newton são empíricos, e ambos trabalhavam de certa forma arraigados nessa visão empírico-indutivista. Ao desenvolver suas teorias Einstein não realizou experimentos, apesar de sugeri-los e comprovar matematicamente muitos de seus embasamentos teóricos.

A resposta do estudante é curiosa, pois, tanto na **Questão 1**, como na **Questão 2** (que será analisada mais adiante) ele sinalizou haver compreendido que os problemas que nortearam Einstein na gênese da relatividade especial foram de natureza teórica e não experimental. Todavia novamente o estudante não viu nos trabalhos de Einstein uma refutação ao empirismo.

A argumentação do estudante parece indicar uma confusão em relação aos termos empírico e empírico-indutivista. Ao que parece os significados de termos como, empirismo, empiricismo e empírico-indutivista, não foram assimilados pelo estudante.

Nível de reflexão crítica: Regular.

Questão 6 – A argumentação de **A3** se mostrou confusa, todavia forneceu indícios de reflexão crítica acerca do papel das teorias na interpretação da natureza.

Sim e não, pois quando Einstein estava trabalhando no desenvolvimento de suas teorias ele se desligou da Física geral, e em contra partida ao desenvolvimento de suas teorias outros estudos estavam sendo realizados, estudos estes que sucederam na mecânica quântica, mas se formos pensar apenas em sua teoria sim, mas se formos pensar pela mecânica quântica não, entenda que este não quer dizer que não somente a teoria de Einstein isoladamente.

A resposta do estudante indica que ele percebeu a influência das teorias sob a forma dos cientistas observarem a natureza.

Nível de reflexão crítica: Regular.

Aluno 4

Questão 1 – O estudante evidenciou de forma inequívoca a sua rejeição ao empirismo. Em sua argumentação pode-se notar bom diálogo com os textos e as discussões em aula.

Concepção empirista. Essa concepção visa que toda a teoria deve partir de uma experiência concreta, ou seja, primeiro vem o experimento depois a teoria. Essa concepção tira todo o aspecto de invenção e criatividades do cientista, o que não é verídico, já que antes de qualquer experimento o cientista, já tem suas concepções teóricas acerca do assunto, então é um tanto quanto perigoso, a utilização dessa concepção porque como foi discutido em sala de aula e nos artigos a teoria Einsteiniana não partiu do resultado da experiência de Michelson-Morley, essa experiência serviu para corroborar a teoria de Einstein frente a comunidade científica, muito diferente de ter servido de base para tal, tanto é que em seu livro sobre a relatividade especial, Einstein não faz qualquer menção a esse experimento.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 5a – O estudante **A4** posicionou-se contrário ao empirismo, salientando que teoria e observação/experimento interagem mutuamente entre si.

Não. Como exemplo pode-se citar o acelerador de partículas que se tem atualmente, tenta-se a partir daquele equipamento corroborar uma teoria já existente, ou seja, uma teoria já imaginada por cientistas, teoria da qual não nasceu do experimento em si, então a Física contemporânea não trabalha nos moldes do empirismo.

Nível de reflexão crítica ou compreensão. Muito Bom.

Questão 6 – O estudante sucintamente apontou a nova interpretação para a gravidade, conferida pela abordagem einsteiniana.

Sim. Porque antes da relatividade geral sabia-se que a gravidade existia, mais não se tinha uma explicação de como ela surgia e a partir do momento que Einstein introduz a gravidade como curvatura do espaço-tempo abre um novo leque de idéias a serem exploradas.

Nível de reflexão crítica: Muito Bom.

Aluno 5

Questão 1 – O estudante explicitou a concepção epistemológica presente nas citações e se posicionou contrariamente a ela e aos relatos históricos sobre a gênese da relatividade especial nela ancorados.

A concepção identificada na citação acima é uma concepção empirista. Ao meu modo de pensar as teorias sobre a natureza não surgem única e exclusivamente de resultados da experiência. Para a formulação da teoria da relatividade restrita, Einstein tinha seus pressupostos teóricos maduros em si, não acredito, tendo lido os textos, que ele tenha utilizado unicamente da experiência para a sua teoria da relatividade. Einstein poderia ter tido lido as descobertas de Michelson e Morley, e tido os dados experimentais obtidos por eles, mas não há nenhuma citação referente a eles em sua teoria da relatividade restrita.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 5a – Na resposta de **A5** pode-se perceber certa ambiguidade. O estudante inicia o seu argumento com um “Sim”, sinalizando a sua concordância com a concepção empirista. Todavia, a continuidade da sua justificativa, apesar da redação confusa, sugere uma discordância desta concepção.

Sim. A relação teoria/observação é um meio de onde novas teorias são formuladas. As teorias possuem uma concepção pré-determinada, e daí é comprovada por experimentação. As novas teorias, elas são derivadas de carga teórica, e não são livres de preconceitos, podendo ou não serem confirmadas com observação/experimento.

Nível de reflexão crítica: Regular.

Questão 6 – O **Aluno 5** ilustrou a sua argumentação confrontando a ação gravitacional instantânea da física clássica à nova interpretação para a ação gravitacional proposta por Einstein.

Acredito que sim. Com a relatividade geral, Einstein formulou uma nova gravitação, e desta forma, muitos cientistas e astrônomos puderam observar os fenômenos com outros “olhos”. Pois antes, eles tinham a gravidade de Newton, e viam as coisas de um jeito (...). Por exemplo, nas duas teorias, se o Sol sumisse, pela gravitação de Newton sentiríamos instantaneamente a sua ação sobre a terra. Pela relatividade de Einstein, como temos o fator tempo, só sentiríamos a sua ausência após 8 minutos, que é o tempo que a luz leva para chegar a terra.

Nível de reflexão crítica: Muito Bom.

Aluno 6

Na **questão 1**, o estudante explicitou o caráter empirista das citações. Contudo, em seu posicionamento faz uma sucinta descrição do experimento de Michelson-Morley e termina por concordar acriticamente com o conteúdo das citações.

É uma concepção empirista. Na experiência de Michelson queria se provar a existência de um meio para propagação da luz. Com suas observações viu-se que dois eventos, dois feixes de luz percorrendo sentidos diferentes chegaram ao mesmo tempo para o observador como se tivessem percorrido o mesmo espaço. Portanto a teoria da relatividade restrita teve haver com concepções comprovadas experimentalmente.

A resposta do estudante sugere que ele não conseguiu distinguir claramente o significado do conceito empirista. No entanto, percebe-se também que, implicitamente, ele está preso a concepção empirista, foi dessa forma que ele aprendeu a pensar ao longo toda a sua formação. É importante considerar também que poucos professores do Curso, parecem conhecer o significado do termo empirista, em sua acepção epistemológica. Além disso, a redação do estudante apresenta problemas.

Nível de reflexão crítica: Insuficiente.

Questão 5a – O aluno não se posicionou frente à concepção empírico indutivista. A sua resposta foi genérica e não ofereceu indícios de reflexão crítica.

A teoria-observação e experimentos formam um conjunto, pois a ciência não é completa, ela não está totalmente descoberta, sempre à mais a se acrescentar em relação à uma determinada teoria.

A resposta do estudante revela que ele não compreendeu a questão. No entanto sinaliza uma reflexão referente à categoria 3. Pode-se perceber também que o estudante apresenta dificuldade na articulação das ideias na forma escrita.

Nível de reflexão crítica: Insuficiente.

Questão 6 – A argumentação do **A6** se mostrou confusa. O estudante não compreendeu a questão.

Sim porque o conceito foi na verdade uma revolução causada pela idéias de Einstein. Os cientistas da época tinham diversas concepções de espaço-tempo, gravidade. Para cada um deles existia uma teoria. Tomando como exemplo o artigo régua relógio, para Lorentz levando em consideração o éter, a régua contrai e o relógio desacelera já para Einstein a régua é uma medida de espaço e o relógio medida do tempo.

É preciso levar em conta que, o aluno e seus pares não tiveram, ao longo do curso, nenhuma oportunidade de efetivamente discutir alguns conceitos fundamentais da física. Pode-se mesmo afirmar, que a aprendizagem foi meramente operativa, aprender o básico para a prova e depois esquecer. Este “básico”, comumente envolve a reprodução em prova das soluções de alguns problemas standard – nem sempre compreendidas e ressignificadas pelo educando. Esta atitude, ao que parece, é muito presente entre os alunos.

Nível de reflexão crítica: Insuficiente.

Aluno 7

Questão 1 – O estudante evidenciou de forma clara e contundente à sua discordância dos relatos empiristas sobre a gênese da relatividade especial.

As afirmações indicam para concepção empírico-indutivista como sendo a concepção epistemológica que norteou os trabalhos de Einstein. Isso não condiz exatamente com a realidade dos fatos. O experimento de

Michelson não comprovou a existência ou não do ÉTER, e Einstein baseou-se em outro problema para desenvolver sua teoria. Einstein tomou como ponto de partida o problema ou conflito entre a teoria eletromagnética e a mecânica, ou seja, não baseou-se em problemas experimentais. A postura empírico-indutivista tenta relacionar o desenvolvimento das teorias como dependentes de experiências, fazendo afirmações do gênero em livros didáticos que acabam reforçando esse tipo de idéia entre os alunos iniciantes. Isso considero prejudicial porque esconde a importância das concepções dos cientistas, do contexto social, e econômico de cada época, dando à ciência um aspecto irreal de que é a verdade absoluta isenta da interferência humana.

É interessante observar que a preocupação do estudante com a presença dos relatos históricos empiristas em sala de aula, evidenciando a compreensão de aspectos contemplados na Categoria 4.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom

Questão 5a – A resposta do **Aluno 7** evidencia com clareza a sua compreensão da dinâmica da relação teoria- observação/experimento na ciência contemporânea.

Não. O que ocorre é uma interação dialética entre teoria e experimento, onde a teoria prevê fatos que devem ser comprovados experimentalmente para efetivá-la e também surgem fenômenos novos nos experimentos que devem ser explicados com o desenvolvimento de novas teorias conforme a necessidade. Teoria e experimento, um depende do outro, um interage com o outro na construção do conhecimento científico.

Nível de reflexão crítica: Muito Bom.

Questão 6 – O estudante evidenciou, com clareza, haver compreendido a influência da teoria da relatividade geral sobre o comportamento e a expectativa de físicos e astrônomos, no trabalho investigação do universo.

Sim, antes da relatividade geral não se pensava em deformações no espaço tempo e no tempo, e sim a ação instantânea da gravidade. O experimento do eclipse feito para comprovar a teoria não era perfeito e mesmo quem o realizou pensava ter comprovado a teoria. A observação foi realizada já na busca do desvio da luz da estrela e isso é

questionável quando se pensa que aquele fato poderia também existir por outro motivo.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Categoria 2 – A historicidade da ciência

Nesta categoria foram reunidas as **Questões: 5b, 7ab, 7c e 8**. O quadro 7, sintetiza os resultados alcançados pelos estudantes na categoria. Neste quadro percebe-se apenas 1 aluno obteve o nível Insuficiente (**A6**). Os demais apresentaram os seguintes níveis de desempenho: Regular (**A1 e A3**); Bom (**A2 e A5**); Muito Bom, (**A4 e A7**).

Quadro 7 - Resultados obtidos na Categoria 2 (A historicidade da ciência)

Aluno	Questão 5 b	Questão 7 ab	Questão 7 c	Questão 8	Desempenho na categoria
A1	Insuficiente	Regular	Muito Bom	Muito Bom	Regular
A2	Bom	Muito Bom	Muito Bom	Insuficiente	Regular
A3	Insuficiente	Muito Bom	Muito Bom	Insuficiente	Regular
A4	Muito Bom	Regular	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
A5	Insuficiente	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Bom
A6	Regular	Insuficiente	Insuficiente	Insuficiente	Insuficiente
A7	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

É importante salientar que as **Questões 5b e 8** têm uma parte de seu enunciado que diz respeito ao ensino de física, aspecto contemplado na Categoria 4, onde essas duas questões reaparecem. Após o quadro 7, analisa-se o desempenho da cada aluno.

Aluno 1

Questão 5b – Não foi respondida pelo estudante.

Nível de reflexão crítica: Insuficiente.

Questão 7ab – As **questões 7a e 7b** foram consideradas como uma. O estudante respondeu corretamente a **letra a**, mas se equivocou na **letra b**, ao citar a física clássica e desconsiderar a relatividade geral. No entanto sua argumentação sinalizou um esforço de reflexão crítica.

a) Mundo macroscópicos e Mundo microscópicos.

b) A física clássica e a física quântica. Por que na física clássica eram tratadas leis e teorias que eram observáveis. Com a formulação da física quântica os físicos passaram a investigar universo em níveis extremamente pequenos (microscópicos).

Nível de reflexão crítica e compreensão: Regular

Questão 7c - A resposta do **Aluno 1** foi muito clara, fornecendo evidências de reflexão crítica e compreensão acerca do conflito entre as duas físicas no mundo contemporâneo, e o conflito que havia na ciência pré-copernicana.

Sim, a ciência já enfrentou uma dicotomia nos tempos do filósofo Aristóteles. Nas suas teorias, Aristóteles dizia que a física era dividida em duas partes: do céu e da Terra. Esse filósofo via a Terra em constantes mudanças e o céu como o mundo imutável. Hoje, os físicos parecem enfrentar uma dicotomia parecida, ou seja, a existência de dois mundos regidos por duas físicas diferentes.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 8 – A argumentação do estudante fornece uma clara evidência de que ele vem desenvolvendo reflexão crítica adquirindo certo nível de compreensão cerca do caráter histórico da atividade científica.

É importante também salientar o seu posicionamento de que declarações desse tipo não devem ser disseminadas na educação científica, o que indica que o estudante vem efetuando esforços no sentido de integrar as reflexões da história e da filosofia da ciência ao ensino de física, um aspecto que é contemplado na Categoria 4.

De acordo os estudos realizados na disciplina, verifica-se que o cientista era movido pelos problemas pela ciência na época. Mas, dizer

que um cientista esta a frente dos outros, mesmo pertencendo a mesma época, seria errado, pois a forma de assumir o problema é o responsável para o sucesso de uma teoria. A imagem do cientista a frente do seu tempo não deve ser levada em consideração na sala de aula, pois da a entender que o cientista estaria vivendo fora da sua época.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom.

Aluno 2

Questão 5b – A resposta do **Aluno 2** foi curta, mas sinalizou reflexão crítica ou compreensão acerca do caráter histórico da ciência.

Nos nossos dias, a ciência atual esta sujeita a erros, o conhecimento é inacabado, sujeito a mudanças.

Convém observar que a resposta do estudante também sinaliza reflexão crítica ou compreensão sobre o caráter provisório e mutável do conhecimento científico, que é contemplado nas questões pertinentes à Categoria 3.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Questão 7ab – Ambas as letras foram muito bem respondida pelo estudante. A sua argumentação na **letra b** forneceu evidências de reflexão e certo nível de compreensão acerca da questão proposta.

a) O mundo macroscópico e o mundo microscópico.

b) Teoria da relatividade geral que envolve a interação gravitacional e a interação eletromagnetismo [...]. Essas duas teorias são como duas famílias que não conversam e nem se suportam, morando na mesma casa. Einstein rejeitava a mecânica quântica devido ao fato de que na mecânica quântica trabalha-se com incertezas e probabilidades e para Einstein DEUS não joga dados para construir o Universo.

Como na questão anterior, a resposta do estudante sinaliza uma reflexão crítica que corrobora, os seus argumentos tecidos nas questões pertinentes à Categoria 3.

Na explanação do estudante, o pesquisador pode notar que, além das leituras e discussões sobre os textos, a exibição de trechos dos documentários seguida por uma discussão sobre os mesmos e a

orientação para assisti-los em casa, relacionando-os e contrapondo-os aos textos foi útil à reflexão do aluno.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 7c - A resposta de **A2** forneceu evidência de reflexão crítica ou compreensão.

Sim. Existia a física do mundo celeste e a física do mundo terrestre nos tempos aristotélicos e houve tal conflito com as novas descobertas de Galileu Galilei, ou seja, na ciência ocidental houve conflitos semelhantes entre os modelos geocêntricos e heliocêntricos.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom.

Questão 8 - A argumentação de **A2** não se contrapôs ao sentido habitualmente atribuído a expressões desse tipo por: cientistas, professores, estudantes e muitos escritores de divulgação científica.

Galileu, Newton e Einstein dedicaram suas vidas exclusivamente à ciência e o estudo sobre o universo. São cientistas além do seu tempo devido à grande descobertas como Galileu e o centro do nosso sistema solar, Newton e a gravidade e Einstein e a relatividade geral.

É importante considerar que o posicionamento do estudante é um reflexo do ele vem assimilando ao longo de sua formação, pois, tradicionalmente, a dimensão histórica da ciência não é considerada na educação científica (EL - HANI; TAVARES; ROCHA; 2004).

Nível de reflexão crítica e compreensão: Insuficiente.

Aluno 3

Questão 5b - Não foi respondida pelo estudante.

Nível de reflexão crítica: Insuficiente.

Questão 7ab – O estudante explicitou com clareza a sua compreensão do que foi proposto.

a) Após o desenvolvimento da relatividade geral de Einstein e o surgimento da mecânica quântica, dois mundos se distinguiram o macro (galáxias, estrelas) e o micro (atômico- partículas).

b) A relatividade geral de Einstein nos traz a visão de um mundo previsível e ordenado, já a mecânica quântica regida pelo mundo das partículas nos traz uma distorção dessas ações previsíveis onde tudo está constantemente se alterando.

É curioso que a argumentação de **A3** nesta questão, sinaliza um processo de reflexão sobre aspectos contemplados na **Questão 6**, respondida pelo estudante de forma, um tanto quanto, evasiva.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom.

Questão 7c - A argumentação do estudante forneceu evidências de reflexão crítica ou compreensão do que foi proposto.

Outros dois mundos, podemos assim dizer, já foram distintos, no estudo e desenvolvimento da ciência, o supralunar e o sublunar, sendo ambos distintos em suas explicações científicas.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom.

Questão 8 – Não foi respondida.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Insuficiente.

Aluno 4

Questão 5b – O estudante evidenciou com clareza haver refletido e desenvolvido um bom nível de compreensão acerca do caráter histórico da ciência.

A ciência atual está sujeita a erros, não é conhecimento puro e acabado, mas não é essa a idéia que é passada nas escolas e até mesmo nas Universidades, porque o que se tenta passar é que conhecimento científico parte da experimentação, por isso não há espaço a erros, mas a ciência esta em constante evolução, então não se pode ter um conhecimento acabado.

É importante observar que a argumentação do aluno atesta à sua compreensão de que no ensino de física normalmente este caráter

histórico da ciência não é apresentado. Percebe-se também que a resposta do estudante revela reflexão e compreensão acerca do caráter provisório do conhecimento científico, o qual se encontra contemplado na Categoria 3.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 7ab – O estudante se equivocou ao responder a letra b.

- a) *O mundo microscópico e o mundo macroscópico.*
- b) *relatividade especial e relatividade geral.*

Nível de reflexão crítica e compreensão: Regular

Questão 7c

Sim. Existia a física do mundo celeste e do mundo terrestre de Aristóteles, porque as leis que regiam um mundo não era a mesma que regia o outro.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom.

Questão 8 - A argumentação do estudante demonstra claramente que ele desenvolveu uma boa reflexão e compreensão acerca do caráter histórico da atividade científica.

Essa expressão reforça a idéia de que esses cientistas trabalhavam solitariamente sem dialogar com os recursos disponíveis, e isso é perigoso, porque é sabido que esses cientistas dialogavam com matemáticos, com as teorias matemáticas de sua época, não é um trabalho isolado do resto do mundo, um exemplo disso foi Einstein que para conseguir terminar a sua teoria utilizou de uma geometria que um matemático estava trabalhando na época, então por mais que esses cientistas tivessem uma genialidade, eles utilizaram os recursos existentes da sua época.

Pode-se perceber que o estudante rejeitou cabalmente a visão de uma ciência a-histórica e a-problemática, e do cientista como um gênio isolado e à frente de sua época – muito comum entre professores e estudantes (GIL, et al. 2001; EL-HANNI, 2006). É importante também destacar que a sua advertência de que “*isso é perigoso*”, sinaliza a sua rejeição à disseminação dessas imagens equivocadas de ciência e

cientista no ensino de ciências, um aspecto que é contemplado na Categoria 4.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom

Aluno 5

Questão 5b - A resposta do estudante foi confusa e distante da questão, não fornecendo indícios de reflexão crítica ou compreensão do que foi proposto.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 7ab - A resposta forneceu evidências de reflexão crítica e compreensão.

a) Na física contemporânea há o surgimento de “dois mundos”, o macroscópico para as coisas grandes e o microscópico para as coisas pequenas.

b) Para o microscópico a teoria é a mecânica quântica. Para o macroscópico é a teoria da relatividade geral. Ocorre esta cisão pelo fato de não conseguir juntar em uma única teoria as duas físicas diferentes.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom.

Questão 7c

Sim. Podemos dar como exemplo, na antiguidade a separação que havia entre o mundo supralunar e o mundo sublunar. Um mundo abaixo (Terra) e um mundo acima (Universo). Nesse contexto havia duas físicas para explicar de forma diferente os dois mundos.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom.

Questão 8 – A reflexão do estudante revela certo nível de compreensão acerca do caráter histórico da atividade científica. Revela também a compreensão do estudante de que, no ensino de física, a ciência e o trabalho científico não devem ser apresentados, como dissociados das influências do contexto cultural em que se inserem.

Essas expressões são utilizadas pelo fato de os mesmos darem um salto em relação a teoria existente, fazendo com que as leis existentes sofressem uma grande mudança para poder entender os fenômenos da natureza. Ao ensinar sobre estes cientistas na escola, os alunos veem os mesmos como um gênio, pelos seus feitos. Para o ensino, isso tem algumas implicações, pois os professores podem passar para os seus alunos, como um gênio. Assim não é um bom questionamento. Esses cientistas devem ser tratados como pessoas que trouxeram uma contribuição de grande valia para o entendimento da natureza.

A redação do estudante apresenta certa ambiguidade, deixando no ar a dúvida: ele concorda, ou discorda do conteúdo implícito na afirmação em tela?

No encontro seguinte à aplicação do questionário, o pesquisador retomou esta questão com o aluno. Ele refletiu e respondeu oralmente que Galileu, Newton e Einstein, fizeram inovações, mas que usaram os conhecimentos disponíveis em sua época, “eles estavam no seu tempo”. A seguir o estudante leu o que havia escrito e percebeu que a primeira parte da sua redação não estava clara, dando margem a uma interpretação diferente.

Assim, consciente da forma como o estudante havia refletido sobre a questão, o pesquisador compreendeu que o nível de reflexão e compreensão do estudante, poderia ser classificado como Muito Bom.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom.

Aluno 6

Questão 5b - A resposta do estudante foi genérica, não fornecendo indícios de reflexão crítica acerca da historicidade da ciência. Em relação ao ensino de física (C₄) o estudante apontou o fato de tópicos da ciência contemporânea não serem habitualmente contemplados nas escolas.

Hoje a ciência em laboratórios de cientistas, os estudos são muito avançados, alguns estudos jamais teriam que ser levados para salas de aula, mas outros deveriam sim ser estudos. O grande problema é que o ensino está muito mais focado na Física de anos atrás. Poucas são as instituições que conseguem dar noção para os alunos de relatividade, sobre partículas, teoria das cordas, mesmo porque a estrutura dos alunos talvez não esteja preparada para essas informações.

Como se pode observar a visão do aluno sobre a ciência e o seu desenvolvimento se revela predominantemente internalista e cumulativa – uma visão tradicional. Convém assinalar que esta visão foi implicitamente transmitida ao estudante, desde antes de sua graduação. Rompê-la, ou ao menos esboçar sinais de questionamentos, exigiria do estudante um grau de interação com textos, documentários e discussões em aula, que ele, efetivamente não conseguir fazer.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular

Questão 7ab – Em ambas a letras, a resposta foi totalmente equivocada e não forneceu indícios de reflexão crítica. Ao que parece, a questão não foi compreendida pelo aluno, sinalizando que sua interação com textos, os documentário e as discussões em sala não foi boa.

a) Força Fraca e Força Forte.

b) Força fraca é a força nuclear com o eletromagnetismo. Força forte a matéria.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 7c – Não foi respondida pelo estudante.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Insuficiente.

Questão 8 - A argumentação do estudante sinalizou uma reflexão ancorada na forma habitual como os cientistas, professores, pensam a questão.

Estes cientistas na verdade são como referencias para as grandes teorias. Suas teorias estavam à frente do seu tempo por possuírem idéias revolucionárias que acabavam fazendo grandes descobertas e postulando grandes teorias que são hoje o foco do ensino da Física. Então as grandes descobertas foram feitas por eles.

A posição do estudante externa uma visão simplista da ciência, que pensa o desenvolvimento interno da ciência como isento ou distanciado das injunções e influências das configurações histórico-culturais.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

ALUNO 7

Questão 5b - A argumentação de **A7** evidenciou com clareza que ele desenvolveu uma boa reflexão crítica e compreensão da questão proposta, tanto em relação à historicidade da ciência (C_2), quanto ao fato de aspectos da natureza da ciência, aparecerem de forma deformada no ensino de ciências, ou simplesmente serem omitidos.

A ciência contemporânea busca partículas fundamentais previstas em teorias. Mas nos experimentos partículas não previstas são detectadas e modificam a teoria também. Assim, experimentos construídos a partir de conhecimentos conhecidos possibilitam conhecer fatos antes desconhecidos e progressivamente novos equipamentos podem ser construídos, em um ambiente onde teoria e prática estão lado a lado ao invés de serem opostas. Geralmente no ensino médio aprende-se que as teorias surgem dos experimentos; mas na realidade os experimentos são construídos também na busca de comprovação para alguma teoria. A busca experimental não é aleatória, mas guiada por pressupostos.

Deve-se observar também que a argumentação evidencia reflexão e compreensão sobre a interdependência entre teoria e observação/experimento corroborando o posicionamento do estudante nas questões pertinentes a esta categoria (C_1).

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 7ab - A resposta do estudante, em ambas as letras, forneceu evidências de reflexão crítica e compreensão.

- a) Mundo subatômico, mundo astronômico. Ou seja, um mundo microscópico e um mundo macroscópico.*
- b) Teoria da relatividade geral para o mundo macro, e mecânica quântica para o mundo microscópico. Essa cisão ocorre porque não se conseguiu explicar a ação da gravidade em uma teoria conjunta com a interação forte, fraca e eletromagnética.*

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom.

Questão 7c - A resposta do estudante foi curta, contudo forneceu evidência de reflexão crítica e compreensão.

Dicotomia semelhante é encontrada quando antes das idéias de Newton o universo era dividido em um mundo supralunar e sublunar.

Embora o estudante tenha se referido à existência dos mundos supra e sublunares vagamente como anterior a Newton, considerou-se o seu desempenho como Muito Bom.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom.

Questão 8 - A argumentação de **A7** foi contundente, explicitando com clareza o seu posicionamento crítico. A reflexão do aluno também foi articulada ao ensino de física.

Essa afirmação coloca os cientistas famosos distantes da sociedade em que viviam. Considero isso irreal. Os cientistas como Galileu, Newton e Einstein tentaram responder problemas de seu tempo, interagindo com a sociedade em que viviam, e não com problemas do FUTURO. Para o estudante, afirmações desse tipo dão a idéia de que as grandes descobertas são distantes da realidade deles, tornando a ciência uma atividade apenas para gênios. Isso cria dificuldades ao ensino. Tornando-se distante do aluno.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Categoria 3 – O caráter provisório, mutável e inventivo do conhecimento científico

Nesta categoria foram reunidas as **Questões: 2, 3, e 4**. O quadro 8, sintetiza os resultados alcançados pelos estudantes na categoria. Apenas 1 aluno obteve um desempenho considerado Insuficiente (**A6**). Os demais apresentaram os seguintes níveis de desempenho: Regular, 1 aluno (**A5**); Bom, 2 alunos (**A2 e A3**) e Muito Bom, 3 alunos (**A1, A4 e A7**). Dentre os estudantes que alcançaram um resultado satisfatório apenas a **Questão 4** teve uma resposta considerada Insuficiente, que foi dada por **A5**. Após o quadro 8, segue-se a análise do desempenho individual dos estudantes.

Quadro 8 - Resultados obtidos na Categoria 3 (O caráter provisório, mutável e inventivo das teorias e conceitos científicos)

Aluno	Questão 2	Questão 3	Questão 4	Desempenho na categoria
A1	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
A2	Muito Bom	Muito Bom	Regular	Bom
A3	Muito Bom	Muito Bom	Regular	Bom
A4	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
A5	Bom	Bom	Insuficiente	Regular
A6	Insuficiente	Regular	Insuficiente	Insuficiente
A7	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Aluno 1

Questão 2 - A resposta do estudante foi muito clara, evidenciando reflexão crítica e compreensão da questão proposta.

O conflito entre a mecânica clássica e as leis do eletromagnetismo foi o principal problema que motivou Einstein para formular a teoria da relatividade especial. Enquanto Lorentz ainda assumia a existência do ÉTER, que poderia influenciar na velocidade da luz, Einstein desenvolveu as suas teorias, sem a existência do ÉTER e a velocidade da luz assumindo um valor constante.

É interessante observar que a resposta equivocada do estudante na **Questão 1** fornece elementos que se ajustam à sua argumentação na presente questão.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 3 - A resposta de **A1** forneceu evidências de reflexão crítica e compreensão da questão.

A incompatibilidade entre a Gravitação Newtoniana e a relatividade especial. Enquanto Newton assumia a gravidade como uma força de atração a distancia, Einstein explicou a gravidade como sendo uma curvatura do espaço-tempo.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 4 - A argumentação de **A1** forneceu evidências de reflexão crítica e compreensão da questão.

Segundo Einstein, o princípio da equivalência seria uma forma de substituir a ação gravitacional por um movimento convenientemente acelerado. Einstein não chegou a este princípio a partir de experimentos, mas afirmava que se uma pessoa dentro de um elevador estivesse em queda livre se sentiria como estivesse no espaço sem a ação da gravidade. Mas se a mesma pessoa agora estivesse no interior de um foguete no espaço, sem a presença da ação gravitacional, se o foguete de repente fosse acelerado a pessoa em seu interior sentiria uma ação parecida com a ação gravitacional da Terra. Para Einstein, isso seria um indício de que a ação gravitacional e o movimento acelerado seriam equivalentes.

A resposta de **A1** evidencia um bom diálogo com os textos e os documentários utilizados em aula.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Aluno 2

Questão 2 - De forma concisa o estudante explicitou a incompatibilidade entre o eletromagnetismo e a mecânica newtoniana, acrescentando, ainda, que a solução de Einstein – a relatividade especial – acarretou um novo conflito, dessa vez com a gravitação newtoniana.

A incompatibilidade entre o eletromagnetismo e a mecânica clássica é resolvida por Einstein com a relatividade especial, que explica vários fenômenos, mas não explica a gravidade. Pela relatividade especial Einstein postula que a velocidade da luz é constante e que nada é mais rápido que a velocidade da luz.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 3 – Conforme se pôde perceber, já na questão anterior o estudante iniciou a sua resposta, ao explicitar que a relatividade especial, “... *não explica a gravidade. Pela relatividade especial Einstein postula que a velocidade da luz é constante e que nada é mais rápido que a velocidade da luz*”. Na questão atual apesar de alguns deslizes na organização das ideias, o aluno avançou em sua explicação ao confrontar a velocidade de propagação finita da gravidade einsteiniana com o caráter instantâneo da gravitação newtoniana.

Einstein ao descobrir a velocidade da luz, percebeu que a teoria de Newton sobre a gravidade estava errada. Einstein postulou a ação da gravidade com efeito espaço-tempo da seguinte forma. O espaço é plano sem a presença de corpos, mas no momento em que o Sol de grande massa se posiciona nesse espaço, o mesmo funciona como uma malha, havendo uma interação entre o Sol e os planetas orbitados em sua volta. Para Newton se o Sol desaparecesse de imediato os planetas sentiriam sua ausência e sairiam orbitando pelo espaço. Para Einstein se o Sol desaparecesse, os planetas levariam um tempo para perceberem sua ausência, devido à deformação do espaço-tempo, ou seja, com o desaparecimento do Sol, teria um certo tempo para que o espaço voltasse a ser plano e com isso afastando os planetas de seu centro. A Terra por exemplo levaria 8 minutos para perceber a ausência do Sol.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 4 – Em sua resposta **A2**, sinalizou haver refletido sobre o princípio de equivalência, embora não tenha precisado a equivalência entre um movimento acelerado e a ação gravitacional. Convém assinalar ainda que o estudante evidenciou ter compreendido que tal princípio não foi derivado de experimentos reais.

O princípio de equivalência substitui a ação da gravidade pelo movimento acelerado. Não. Einstein não era um físico experimental, apesar de ter acesso a laboratórios, ele chegou a essa ideia através da teoria relativista.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Aluno 3

Questão 2 - O estudante evidenciou uma boa compreensão da questão ao salientar que “o eletromagnetismo não respeitava as transformações de Galileu como a mecânica newtoniana”.

Um dos principais problemas que nortearam Einstein no desenvolvimento da teoria da relatividade especial, era o conflito existente entre o eletromagnetismo, desenvolvido por Maxwell, e a mecânica de Newton, pois o eletromagnetismo não respeitava as transformações de Galileu como a mecânica newtoniana.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 3 – A argumentação do estudante foi muito clara evidenciando a sua compreensão da questão.

Com o desenvolvimento da teoria da relatividade especial, Einstein teve outro problema, a de relacioná-la com a gravidade, e esta foi uma das questões principais que o norteou a desenvolver a relatividade geral, pois para ele a gravitação era tratada como sendo a curvatura espaço-tempo, e não uma ação de força a distancia como referenciada por Newton.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 4 – A resposta de **A3** se mostrou incompleta, mas forneceu indícios de reflexão crítica. O aluno chegou a fazer o esboço de um elevador em movimento acelerado, para auxiliar a sua reflexão, mas não conseguiu precisar o princípio de equivalência.

O princípio da equivalência está associado a aceleração, se um determinado sistema é acelerado, em relação a um outro sistema em repouso totalmente livre de uma ação gravitacional, dizemos que ele é regido pelo princípio da equivalência. Einstein nos dá um exemplo, o do elevador.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Aluno 4

Questão 2 – O estudante fez uma boa exposição do conflito entre o eletromagnetismo e a mecânica clássica e de algumas das mudanças

conceituais, acarretadas pela relatividade especial, fornecendo assim evidência de compreensão da questão.

Havia uma incompatibilidade entre a mecânica clássica e a teoria eletromagnética. Quando se aplica as transformadas [transformações] de Galileu a essa teoria surgiram incompatibilidades, assimetrias nas duas teorias. Outro problema era que se considerava tempo e espaço absolutos. Então a idéia de Einstein era de criar uma teoria que resolvesse esse conflito. As mudanças que ocorreram com essa teoria foi de que a velocidade da luz era imutável, independentemente da posição do observador, e que massa e energia estavam intimamente relacionadas.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 3 – A resposta de **A4** foi muito bem construída, demonstrando de forma clara e inequívoca a sua compreensão da questão.

Com a idéia de que nada pode se mover mais rápido que a luz, surge um problema da relatividade especial com a gravitação de Newton, porque para Newton a interação gravitacional era instantânea, por exemplo, se o Sol desaparece, no mesmo momento a Terra sairia de Órbita, mas a luz proveniente do Sol leva 8 minutos para chegar até nós, então a interação gravitacional era um fenômeno instantâneo ultrapassando a velocidade da luz, então era preciso uma teoria que explicasse o fenômeno da gravidade que a relatividade especial não explicava e que resolvesse esse conflito entre gravitação newtoniana e relatividade especial. Foi então que surgiu a relatividade geral que considera a gravidade como uma curvatura do espaço-tempo. E que considera que a interação gravitacional pode ter a mesma velocidade da luz, mais não ultrapassá-la, que é condizente com a relatividade especial. Então se o Sol desaparecesse nós aqui na Terra sentiríamos esse efeito após 8 minutos, ao mesmo tempo tanto no sentido da visão, como na interação gravitacional. A mudança que essa teoria acarretou é que a interação gravitacional dos planetas não se dá instantaneamente.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 4 – A resposta do estudante forneceu evidências de compreensão da questão proposta.

O princípio de equivalência consiste na indistinguibilidade de movimento acelerado e gravitação então não há diferença entre movimento acelerado sem gravidade e movimento sem aceleração com a presença da gravidade então se o movimento acelerado causa uma curvatura no espaço a gravidade também causa. Einstein não chegou a este princípio a partir do experimento, ele apenas fez uma analogia ao movimento de um elevador que quando está descendo parece que se sente os pés mais leves, ou seja, parece que não se tem gravidade atuando, se o movimento for acelerado, sentiria-se os pés flutuando.

Nível de reflexão ou compreensão crítica. Muito Bom.

Aluno 5

Questão 2 – A resposta de **A5** forneceu indícios de reflexão crítica e certo nível compreensão da questão. O estudante pontuou que a relatividade restrita emergiu do esforço de superar as incongruências entre a mecânica clássica o eletromagnetismo, embora, de forma inadequada, tenha se referido a esse esforço como tentativa de unificar as duas teorias.

A relatividade especial surge da tentativa de unificar o eletromagnetismo (Maxwell) com a mecânica clássica. Na relatividade especial, para Einstein, nada poderia ser mais veloz do que a velocidade da luz. A velocidade da luz no éter é 300.000 km/s e nada poderia ser maior que isto [...]. As mudanças conceituais acarretadas pode ser pelo fato da luz se propagar no 'vácuo' ser constante.

Nível de reflexão crítica ou compreensão. Bom

Questão 3 – A resposta de **A5** mostrou certa dificuldade na organização das ideias, mas forneceu indícios de reflexão crítica ou compreensão da questão proposta.

A relatividade geral surge da unificação da relatividade especial com a gravitação de Newton. Quando Einstein faz sua teoria da relatividade especial, ela [...] não se enquadra (...) para a gravidade de Newton. Assim, ele formula uma gravitação que surge da curvatura espaço-tempo. Para essa concepção, ele exemplifica como se houvesse uma rede de borracha e nela coloquemos um objeto de grande massa, como o Sol. Daí haveria uma curvatura neste meio [...]. Assim [...], a gravidade é uma curvatura espaço-tempo.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Bom.

Questão 4 – A resposta do **A5** foi e equivocada, não fornecendo indícios de reflexão crítica.

Este princípio consiste do chamado espaço-tempo. Einstein não chegou a este princípio a partir de experimentos. Com este princípio Einstein verificou que existia um espaço em relação ao tempo para a propagação da luz. Pois a propagação da luz era constante.

Apesar de sua resposta equivocada pode-se perceber que o estudante explicitou que Einstein não chegou ao princípio de equivalência pela via experimental, sinalizando um posicionamento não empirista.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Aluno 6

Questão 2 – A resposta foi superficial, não fornecendo indícios de reflexão crítica.

Para Einstein a velocidade da luz é constante, sendo que nada pode ser igual ou ultrapassar essa velocidade.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente

Questão 3 – A resposta de **A6**, apesar de evidenciar a dificuldade do estudante na organização das ideias, forneceu alguns indícios de reflexão crítica.

A relatividade geral surgiu para solucionar a problematização da gravidade e a relatividade especial, seria então uma unificação. O espaço possui 4 dimensões. Para Einstein em sua teoria, o universo é como um plano dimensional, que estão a Terra, o Sol e outros planetas, sua curvatura é influenciada pela massa, o Sol por possuir uma massa maior que a Terra forma essa curvatura, então se ele sumisse, a curvatura desse plano demoraria para atingir a Terra pois a onda da curvatura teria que chegar a Terra.

Nível de reflexão crítica: Regular

Questão 4 – O estudante apenas sinalizou, de forma vaga, uma possível relação entre a ação gravitacional e um movimento acelerado.

Aceleração e gravidade.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Aluno 7

Questão 2 - A resposta do estudante foi curta e incisiva, indo direto ao cerne da questão ao explicitar que a luz, “*não respeitava ou seguia as transformações de Galileu*”.

O problema entre o eletromagnetismo e a mecânica, onde a luz não respeitava ou seguia as transformações de Galileu. Com essa teoria a velocidade da luz passou a ser constante e o limite máximo de velocidade que poderia ser alcançada.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 3 – De forma concisa, **A7** explicitou o problema da ação instantânea da força gravitacional newtoniana.

Para a relatividade geral o problema foi em relação à instantaneidade da ação da força gravitacional. Com a relatividade especial nada poderia ser mais veloz que a luz. Assim, a ação da força da gravidade não poderia ser instantaneamente como afirma a relação proposta por Newton. Com a relatividade geral a gravidade passou a ser devido à deformação do espaço-tempo onde a presença de um corpo com massa deformaria o espaço ao seu redor.

Nível de reflexão crítica: Muito Bom.

Questão 4 – O estudante deu um explicação clara e concisa do princípio de equivalência, deixando evidente o seu posicionamento anti-empirista.

O principio da equivalência afirma que não é possível distinguir quando um corpo está sob ação de um campo gravitacional ou quando está acelerado longe de qualquer efeito da gravidade. Assim as suas situações seriam equivalentes. Einstein chegou a esse principio fazendo experiências mentais e não reais. Seu trabalho era intelectual. Dessa

forma não é possível relacionar a atuação de Einstein à concepção empirista.

É importante assinalar que a argumentação do estudante também forneceu evidências de sua compreensão acerca da relação teoria-observação/experimento (Categoria 1).

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Categoria 4 – Contribuições da intervenção didática para a reflexão do aluno sobre o potencial educativo da história e filosofia da ciência no ensino de física

Nesta categoria foram agrupadas as **Questões: 5b, 8, e 9**. O quadro 9, sintetiza os resultados alcançados pelos estudantes. Neste quadro visualiza-se que 3 estudantes obtiveram um desempenho considerado Insuficiente (**A2, A3 e A6**); 2 sinalizaram um desempenho Regular (**A1 e A5**) e 2 alunos alcançaram um desempenho Muito Bom (**A4 e A7**). Após o quadro 9 segue-se a análise das respostas dos estudantes às questões apresentadas.

Quadro 9 - Resultados obtidos na Categoria 4 (Contribuições da intervenção didática para a reflexão do aluno sobre o potencial educativo da história e filosofia da ciência no ensino de física)

Aluno	Questão 5b	Questão 8	Questão 9	Desempenho na categoria
A1	Insuficiente	Muito Bom	Muito Bom	Regular
A2	Insuficiente	Insuficiente	Muito Bom	Insuficiente
A3	Insuficiente	Insuficiente	Insuficiente	Insuficiente
A4	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
A5	Insuficiente	Muito Bom	Muito Bom	Regular
A6	Regular	Insuficiente	Insuficiente	Insuficiente
A7	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Aluno 1

Questão 5b – Não foi respondida pelo estudante.

Nível de reflexão crítica: Insuficiente.

Questão 8 – Após discordar do conteúdo da expressão, “Galileu, Newton e Einstein foram cientistas que estavam muito à frente de seu tempo”, o estudante situou muito bem as suas possíveis implicações no ensino de física.

De acordo os estudos realizados na disciplina, verifica-se que o cientista era movido pelos problemas pela ciência na época. [...] A imagem do cientista a frente do seu tempo não deve ser levada em consideração na sala de aula, pois da a entender que o cientista estaria vivendo fora da sua época.

O posicionamento do estudante fornece uma boa evidência de seu esforço reflexivo no sentido de integrar as reflexões da história e da filosofia da ciência ao ensino de física.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom.

Questão 9 – Para **A1** os documentários podem reproduzir uma visão distorcida da história da ciência. De forma concisa o estudante citou a lenda da maçã, que foi reproduzida de forma acrítica e fantasiosa no documentário, Fronteira da Física: o universo elegante, exibido em sala de aula.

Tomar cuidado com as distorções sobre a história da ciência. Exemplo: Newton não formulou a sua teoria após a queda da maçã sobre a sua cabeça.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Aluno 2

Questão 5b – Conforme visto anteriormente (Categoria 2) , a resposta de **A2** sinalizou reflexão crítica ou compreensão acerca do caráter histórico da ciência, contudo o estudante não relacionou a sua reflexão com ensino de física.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 8 – A2 não articulou à sua reflexão ao ensino de física.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Insuficiente.

Questão 9 – Assim como **A1**, o estudante **A2** apontou a deformação da história da ciência. Como exemplo apontou a lenda da maçã. Apesar dos problemas de redação considerou-se a resposta do estudante como muito boa.

Bom, em primeiro lugar é preciso cuidar algumas afirmações, como há no documentário Universo Elegante, sobre a descoberta da gravidade de Newton, há controversas no modo como foram explicitas, pode causar mais dúvidas no aluno.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom

Aluno 3

Questão 5b - Não foi respondida pelo estudante

Nível de reflexão crítica: Insuficiente.

Questão 8 – Não foi respondida.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Insuficiente.

Questão 9 – A argumentação de **A3** foi genérica e não forneceu indícios de reflexão crítica acerca do uso da história da ciência no ensino de física.

Devemos cuidar para que ao utilizarmos documentários de divulgação científica como recurso didático em aula, estes sejam colocados de uma forma mais simples possível para que seja entendido como uma relação do que já é visto nos livros, para que não haja um conflito na compreensão dos mesmos.

A reflexão de **A3** se mostrou acrítica em relação à deformação da história da ciência no ensino.

Nível de reflexão crítica: Insuficiente.

Aluno 4

Questão 5b – A argumentação de **A4** atesta à sua percepção de que no ensino de física, normalmente, o caráter histórico da ciência não é apresentado. Mas, segundo o estudante “não se pode ter um conhecimento acabado”.

A ciência atual está sujeita a erros, não é conhecimento puro e acabado, mas não é essa a idéia que é passada nas escolas e até mesmo nas Universidades, porque o que se tenta passar é que conhecimento científico parte da experimentação, por isso não há espaço a erros, mas a ciência esta em constante evolução, então não se pode ter um conhecimento acabado.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 8 – Após rejeitar a ideia de “cientistas muito à frente de seu tempo”, o estudante sinalizou o seu posicionamento contrário à disseminação de expressões como estas no ensino de física ao alertar que, “isso é perigoso”.

Essa expressão reforça a idéia de que esses cientistas trabalhavam solitariamente sem dialogar a, com os recursos disponíveis, e isso é perigoso, porque é sabido que esses cientistas dialogavam com matemáticos, com as teorias matemáticas de sua época, não é um trabalho isolado do resto do mundo...

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom

Questão 9 – A resposta do estudante foi um curto e incisivo arremate à reflexão por ele iniciada na questão 8.

Os documentários podem reforçar a idéia de heróis.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Aluno 5

Questão 5b – A resposta do estudante foi confusa e distante da questão, não fornecendo indícios de reflexão crítica ou compreensão do que foi proposto.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 8 – O estudante salientou o cuidado que se deve ter para que a imagem de “gênio” não seja disseminada no ensino de física. Segundo **A5**, a transmissão dessa imagem entre os alunos, “*não é um bom questionamento*”.

[...] Ao ensinar sobre estes cientistas na escola, os alunos veem os mesmos como um gênio, pelos seus feitos. Para o ensino, isso tem algumas implicações, pois os professores podem passar para os seus alunos, como um gênio. Assim não é um bom questionamento. Esses cientistas devem ser tratados como pessoas que trouxeram uma contribuição de grande valia para o entendimento da natureza.

Nível de reflexão crítica e compreensão: Muito Bom.

Questão 9 – O estudante apontou as simplificações ou distorções na história da ciência, assinalando ainda que a versão histórica de um episódio apresentada em documentário pode ser conflitante com a versão pseudo-histórica presente no manual didático (ALLCHIN, 2004).

Ao utilizarmos este recurso didático em sala de aula, temos que estar atento as distorções trazidas ao longo da história. Pois nos livros didáticos estão apresentados fatos de um modo “não verdadeiro”, e quando levamos este recurso de modo controverso ao que os alunos já aprenderam, pode gerar um choque de conceitos. Por exemplo, nos livros didáticos, temos a história da maçã de Newton, que é uma versão distorcida da verdade. E tem artigos que mostram a verdadeira história. A divulgação científica é importante, a forma de trata-la que deve ser bem analisada.

Convém destacar a observação do estudante de que, há artigos que apresentam relatos históricos mais consistentes e ricos, ou, usando a sua linguagem, “*que mostram a história verdadeira*”. A observação do estudante sinaliza que o trabalho de intervenção didática contribuiu para que ele e outros estudantes da turma iniciassem um processo de articulação de elementos da HFC à sua reflexão sobre o ensino de física.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Aluno 6

Questão 5b – Em sua argumentação **A6** esboçou um reflexão sobre o ensino de física ao assinalar que “o ensino está muito mais focado na Física de anos atrás”, não contemplando assim tópicos da física contemporânea. No entanto, a visão do estudante sobre o ensino de física, ao que parece, não se afastou da visão tradicional.

Hoje a ciência em laboratórios de cientistas, os estudos são muito avançados, alguns estudos jamais teriam que ser levados para salas de aula, mas outros deveriam sim ser estudos. O grande problema é que o ensino esta muito mais focado na Física de anos atrás. Poucos são as instituições que conseguem dar noção para os alunos de relatividade, sobre partículas, teoria das cordas, mesmo porque a estrutura dos alunos talvez não esteja preparada para essas informações.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Regular.

Questão 8 – A argumentação do estudante, em relação à veiculação no ensino de física da ideia de cientistas muito à frente de seu tempo, se mostrou acrítica quanto à visão de ciência a-histórica e a-problemática, assim como aos exemplos de pseudo-história, presentes em muitos manuais didáticos, livros e documentários de divulgação científica.

Estes cientistas na verdade são como referencias para as grandes teorias. Suas teorias estavam à frente do seu tempo por possuírem idéias revolucionárias que acabavam fazendo grandes descobertas e postulando grandes teorias que são hoje o foco do ensino da Física. Então as grandes descobertas foram feitas por eles.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Questão 9 – A resposta de **A6** não forneceu evidências de que ele refletiu sobre a questão, à luz dos conhecimentos veiculados e discutidos na disciplina.

Os recursos devem ser usados de forma que não confunda o aluno. Se o artigo tem uma linguagem distante do aluno, quando usamos vídeos está ligado com a discussão o recurso é valido; no exemplo da teoria das

cordas onde nos mostra o universo, formado por filamentos chamados de cordas que vibram com a energia, essa vibração cria a matéria, vendo em vídeo é muito mais claro que apenas lermos.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Insuficiente.

Aluno 7

Questão 5b – Ao articular a sua resposta ao ensino de física **A7** foi crítico em relação à imagem empirista da ciência que, geralmente, é transmitida nas escolas.

[...] Geralmente no ensino médio aprende-se que as teorias surgem dos experimentos, mas na realidade os experimentos são construídos também na busca de comprovação para alguma teoria. A busca experimental não é aleatória, mas guiada por pressupostos.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 8 – O estudante refutou de forma incisiva a disseminação no ensino de física de expressões que colocam grandes cientistas, como homens à frente de seu tempo.

Essa afirmação coloca os cientistas famosos distantes da sociedade em que viviam. Considero isso irreal. [...] Para o estudante, afirmações desse tipo dão a idéia de que as grandes descobertas são distantes da realidade deles, tornando a ciência uma atividade apenas para gênios. Isso cria dificuldades ao ensino. Tornando-se distante do aluno.

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

Questão 9 – O **Aluno7** fez uma boa reflexão crítica acerca do uso didático dos documentários em sala de aula, destacando que o professor não só deve estar atento a tais problemas, como deve discuti-los com seus alunos em sala de aula.

Os documentários podem fazer uso de recursos visuais que reforçam as concepções do senso comum. Ao invés de ajudar podem criar mais dificuldades. Exemplo disso é a representação do átomo como sendo formado de um núcleo e os elétrons como “bolinhas” girando ao seu redor como planetas. Não é possível ver um elétron, como afirmar que estão girando desse modo? Outro problema é representar leptons e

quarks sendo que não sabemos a sua forma concreta. O professor deve discutir tais problemas com os alunos para não reforçar as concepções espontâneas dos mesmos.

É interessante observar o papel que o estudante atribui ao professor no uso crítico dos recursos visuais presentes nos documentários e livros didáticos, tendo em vista que alguns desses recursos podem reforçar alguns dos obstáculos epistemológicos à aprendizagem, como adverte Moreira (2007). A argumentação do estudante, sem dúvida, remete ao exercício de vigilância epistemológica que o professor deve exercer sobre os objetos didáticos inventados no âmbito do saber a ensinar (CHEVALLARD, 2005).

Nível de reflexão crítica ou compreensão: Muito Bom.

7.2.2 Considerações sobre a intervenção didática em sua segunda fase: avaliação do desempenho dos estudantes no questionário e análise dos dados advindos da segunda entrevista

O quadro 10 abaixo oferece uma visão geral do desempenho dos estudantes no 2º questionário aplicado. A partir dele, empreende-se uma reflexão geral sobre o trabalho de intervenção didática. A análise das respostas ao 2º questionário conjugadas à que foi empreendida com os dados das entrevistas propiciaram uma melhor avaliação acerca do desempenho dos estudantes e das contribuições da intervenção didática.

Quadro 10 - Desempenho dos alunos nas categorias

Aluno	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Desempenho geral
A1	Insuficiente	Regular	Muito Bom	Regular	Regular
A2	Regular	Regular	Bom	Insuficiente	Regular
A3	Regular	Regular	Bom	Insuficiente	Regular
A4	Muito Bom				
A5	Bom	Bom	Regular	Regular	Regular
A6	Insuficiente	Insuficiente	Insuficiente	Insuficiente	Insuficiente
A7	Muito Bom				

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

A compreensão da relação teoria-observação/experimento nos moldes preconizados pela concepção empírico-indutivista não é a única, mas talvez seja a principal das concepções equivocadas sobre a natureza da ciência presentes entre estudantes, professores de física e mesmo cientistas (MOREIRA; MASSONI; OSTERMANN; 2007; GIL et al., 2001).

Na intervenção didática, o exame crítico da concepção empírico-indutivista, foi continuamente realizado nos diversos textos utilizados e nas discussões por eles suscitadas. Os dados obtidos com aplicação do 2º questionário sinalizam que esta concepção foi perturbada e, até certo ponto, modificada pela maior parte dos estudantes participantes da experiência didática. Entretanto, a concepção empírico-indutivista não foi inteiramente superada por uma parcela significativa dos estudantes.

Para chegar à conclusão acima, o pesquisador procurou inserir no questionário aplicado questões que se contrapunham ao enfoque habitualmente visto pelos estudantes nas distintas disciplinas científicas do curso. Ao responder a essas questões, os estudantes desatentos, ou que não interagiram de forma crítica com alguns aspectos dos textos e discussões em aula, revelaram resquícios de suas concepções empiristas, pois, quando questionados “toda observação é carregada de pressupostos teóricos?”, os estudantes respondiam afirmativamente, mas nas respostas às questões mais elaboradas evidenciavam resquícios de suas concepções empiristas.

Dessa forma, pode-se afirmar que, nominalmente, nenhum dos estudantes avaliados se manteve no patamar de empirista ingênuo (CHALMERS, 1993). Todavia, numa análise mais criteriosa, percebe-se que, se por um lado nenhum dos participantes pode, realmente, ser “rotulado” como empirista ingênuo, por outro, não se pode afirmar que houve superação da concepção empírico-indutivista.

Cabe salientar que esses estudantes, ao longo de sua formação, tiveram poucas oportunidades de discutir e refletir criticamente sobre esta concepção, tendo sido a disciplina Evolução dos Conceitos de Física o primeiro espaço formal em que esta concepção foi analisada criticamente de forma sistemática.

Assim, justifica-se a prudência na conclusão acima, pois várias pesquisas têm assinalado que a superação da concepção empirista não é um processo simples e redutível ao tempo didático de uma única disciplina ao longo de todo o curso (OKI; MORADILO, 2008; TEIXEIRA; FREIRE JR; EL-HANNI, 2004).

Em relação às outras categorias de análise, sabe-se que os aspectos da natureza da ciência relacionados à sua historicidade (C2) e

ao caráter provisório, mutável e inventivo do conhecimento científico (C3), tradicionalmente aparecem no ensino de ciências/ física de forma deformada ou simplesmente não aparecem (MEDEIROS, 2007). E no que diz respeito à articulação dos conhecimentos históricos e epistemológicos ao ensino de física, sabe-se que esta iniciativa sequer é pensada nos quadros tradicionais do processo de transposição didáticas dos saberes do nível científico para o nível escolar, incluindo-se aqui o ensino superior (PINHO ALVES, 2000).

Dentre os sujeitos que participaram da segunda fase da experiência didática, dois (**A4** e **A7**) tiveram um desempenho Muito Bom em todas as categorias, evidenciando uma interação crítica e criativa, com os recursos didáticos apresentados - textos e documentários - assim como uma significativa participação nas discussões em aula.

O aluno **A6** teve um fraco desempenho, evidenciando em suas respostas não ter compreendido as questões propostas. As argumentações do estudante mostraram uma interação superficial com os textos e discussões em aula, assim como uma grande dificuldade de articulação das ideias na forma escrita.

Os alunos **A1**, **A2**, **A3** e **A5**, constituíram o bloco dos alunos medianos. Estes estudantes se caracterizaram por um desempenho flutuante (do Insuficiente ao Muito Bom) ao longo das questões pertinentes as quatro categorias de análise. Uma característica que também se verificou nas respostas ao primeiro questionário.

Este grupo é especialmente significativo, pois, de certo modo, corresponde ao perfil médio dos estudantes de física que compõem o Curso. Esses estudantes, em geral, não tinham desenvolvido até então, o hábito da leitura e reflexão crítica e tendiam a aceitar acriticamente o conteúdo escrito nos textos.

Pôde-se perceber também certa timidez e até resistência à proposta de um trabalho docente-discente na perspectiva dialógica. O que não é de se estranhar, afinal os estudantes vinham sendo formados em outra perspectiva.

Dessa forma, os avanços e resistências desse grupo, em relação a uma visão de ciência mais próxima ao que a epistemologia contemporânea considera consensual, são de significativa importância para a análise das contribuições da intervenção didática, de suas potencialidades e limitações.

A partir deste momento considera-se oportuno trazer para essas considerações a análise dos dados advindos da série de entrevistas. Antes, porém, convém explicitar as suas características principais. A

entrevista foi planejada com o objetivo de fornecer dados adicionais acerca do desempenho do estudante e das possíveis contribuições da intervenção didática, no sentido de propiciar a ele o desenvolvimento de uma compreensão mais adequada da natureza da ciência e do processo histórico de construção e transformação das teorias e conceitos científicos, apresentados e discutidos nesta segunda unidade da sequência didática.

Dentro deste espírito, elaborou-se um roteiro básico de tópicos para as entrevistas. As questões centrais do roteiro estavam diretamente relacionadas às quatro categorias de análise apresentadas no questionário:

- A relação teoria-observação/experimento;
- A historicidade da ciência;
- O caráter provisório e inventivo do conhecimento científico;
- Possíveis contribuições da intervenção didática para a reflexão do estudante sobre o potencial educativo da história e filosofia da ciência no ensino de física.

A partir deste núcleo de questões, outros aspectos da intervenção poderiam ser contemplados tais como:

- A interação com os documentários e com os textos utilizados;
- O posicionamento do estudante sobre o uso dos documentários e os cuidados que se deve ter ao utilizar este recurso didático em sala de aula;
- O posicionamento do estudante sobre o uso da história da ciência no ensino de física;
- As dificuldades encontradas pelo estudante ao longo da intervenção – o hábito de leitura.

Esta segunda série de entrevistas foi realizada com o mesmo conjunto de estudantes que participou da primeira: **A1, A4, A5 e A7**. Além das razões já apontadas na primeira fase da intervenção para a escolha desses alunos, uma razão adicional era que a presença deles em ambas as fases forneceria elementos para avaliar os possíveis progressos por eles efetuados ao longo de todo o processo.

Retornando agora às considerações sobre a intervenção didática, toma-se como ponto de partida a Categoria 1.

Categoria 1

Reportando-se às respostas formuladas pelos estudantes na Categoria 1, verificou-se que a **Questão 5a** foi especialmente problemática para os alunos medianos. Por exemplo, **A1** e **A2** não forneceram indícios de reflexão crítica em suas argumentações; **A3** e **A5** deram respostas com certa ambiguidade. Para **A5**, o problema situou-se na escrita, enquanto que em **A3**, ao que parece, houve uma confusão acerca do significado dos termos, empírico e empírico-indutivista. Este problema também foi detectado em **A1**, que na **Questão 1**, evidenciou não ter clareza acerca do significado da expressão concepção epistemológica; o quê, de certa forma, sinaliza a ausência de resposta na **Questão 5a** como uma resposta.

É importante, no entanto, salientar que **A1** fez um argumentação muito boa na **Questão 6**, evidenciando um posicionamento que o afasta do empirismo. Do mesmo modo, **A3** sinalizou, ainda que de forma incipiente, nas três questões da categoria, um posicionamento crítico em relação ao empirismo. Ao que parece, esses estudantes, estão processando em suas mentes o conceito de empirismo e assumindo posicionamentos anti-empiristas, embora não reconheçam explicitamente o significado da expressão empírico-indutivista.

A seguir reproduzem-se alguns fragmentos das entrevistas com os sujeitos **A1**, **A4**, **A5** e **A7**. Esses fragmentos, ao contemplarem a linguagem oral, revelaram aspectos da compreensão do estudante acerca da relação teoria-observação/experimento que não puderam ser evidenciados no Questionário.

Os dados obtidos por meio da entrevista evidenciaram nos alunos certo grau de desenvolvimento dos conceitos.

Em suas respostas às questões apresentadas todos os estudantes assinalaram a influência dos pressupostos teóricos na observação e na experimentação, demonstrando, com maior ou menor clareza, um posicionamento não empirista. Os estudantes **A4** e **A7**, com muita convicção e segurança ratificaram a compreensão anti-empirista demonstrada em suas respostas aos dois questionários aplicados em distintos momentos da intervenção didática. Os alunos **A1** e **A5**, embora demonstrassem certa hesitação e dificuldade na organização de suas respostas, forneceram informações relevantes sobre a forma como pensam essa questão.

A1 declarou que só na segunda fase da intervenção didática, começou a adquirir uma melhor compreensão sobre o papel dos pressupostos teóricos na observação:

A1. Primeiramente ... pela disciplina dava a entender que... a ciência vinha sendo construída através do experimento, realmente. Mas com a parte final da... da disciplina eu pude perceber que... que não era bem isso... que a ciência vinha sendo ... já dá para fazer certas previsões né...que a gente tava trabalhando na sala... Que assim, que é possível fazer previsões através da teoria e não mais assim... dá uma...dá a entender que ela, que a ciência não vem da observação.

Ao ser questionado sobre o papel do experimento na construção do conhecimento, o estudante esboçou uma contradição com o posicionamento acima. O pesquisador explorou este aspecto e o estudante ratificou a sua posição inicial.

A1. [...] Eu acho que são dois... dois aspectos que caminham juntos, tanto a teoria como o experimento. Porque você pode chegar à teoria através do experimento”.

P. Chega à teoria através do experimento? Necessariamente assim?

Não. Em alguns pontos é assim, mas tem parte que você não...não é possível chegar à teoria através somente do experimento.

As declarações de **A1** denotam o peso das ideias empiristas na sua formação, ilustrando que a superação desta concepção não é uma tarefa simples.

Em sua resposta **A5** logrou expor a sua compreensão acerca da interdependência entre teoria-observação/experimento com uma clareza que ficou obscurecida na linguagem escrita.

A5. A teoria e observação [...]. Que a teoria ... ela não surge unicamente da observação. Há uma relação, a teoria, ela não surge do experimento, surge de conceitos que já tem determinado; um conceito que o cientista tem antes, tipo assim, ele não parte do nada para fazer o experimento para fazer uma teoria. Já tem um pressuposto antes, ele já sabe para ele ir buscar. E com o experimento,

ele pode encontrar algo novo, mas ele parte a partir do princípio que ele já sabe alguma coisa.

No depoimento de **A4**, é interessante chamar a atenção para a forma espontânea como ele assinalou a sua compreensão da relação teoria-observação/experimento, antes de seu contato com disciplina.

A4. [...] Antes da disciplina eu pensava assim que a ciência ela se originava de experimentos. Tipo assim, o cientista ele fazia experimento, comprovava, [...] então era aquilo mesmo, então aquilo que era o conhecimento científico. Na minha visão não tinha abertura para assim, criatividade por parte dos cientistas,

P. Mas o experimento tem importância?

Tem sim, com certeza, mas não quer dizer que a teoria só parte do experimento, então tem abertura para a criatividade, para ideias.

O estudante **A5** também situou muito bem o modo como pensava essa questão, ao ser diretamente questionado pelo pesquisador.

P. Você sempre pensou desse jeito, dessa forma?

A5. Não. Sempre vi a teoria, a teoria está pronta. Mas que ela surgiria do experimento. Eu sempre pensei assim, que houve uma experiência para a formulação da teoria que teria que ter o experimento para a formação de uma teoria. Teve alguma observação, aí é que se formulou a teoria.

O estudante **A7** diante do mesmo questionamento foi bastante claro em sua exposição:

A7. Tinha uma bagunça na cabeça. Em nenhum momento tinha sido abordado tanto as definições de uma forma mais profunda assim, era muito no acho, acho isso, acho aquilo.

P. Sim, mas e a tua graduação, esta visão do método científico foi reforçada?

Dependendo do momento, né?

P. Por exemplo?

Nas aulas de laboratório e em alguns momentos, mesmo que o professor falava para; aliás os professores falavam no laboratório para você não

discutir com seus dados, uma coisa assim, refletir sobre os seus dados e desenvolver modelo a partir dos dados, para mim isso é uma visão empirista.

Retornando ao estudante **A1**, um momento significativo na sua fala, foi quando o pesquisador lhe perguntou diretamente se a teoria da relatividade geral se ajustava ao esquema empírico-indutivista, sintetizado na definição do método científico. O estudante acabara de discordar deste esquema, citando a anedota do peru indutivista (CHALMERS, 1993), quando lhe foi lançada esta questão:

P. A relatividade geral ela foi construída desse jeito? Dessa maneira?

A1. Não, acho que não...

P. Tente dar um exemplo.

(... o Aluno reflete durante algum tempo..)

Porque ele buscou uma forma de explicar né, ... por exemplo a gravidade, cada um tinha explicado de um jeito desde Aristóteles que falava que ... a queda dos corpos que sempre tendia a ir para o seu lugar natural. Newton já falava que era uma força de atração e o Einstein continuou querendo explicar esse fenômeno, só que ele não usou as mesmas explicações dos cientistas, anteriores.

P. Ele fez experimentos para isso? Apoiou-se em experimentos de seus contemporâneos?

Um experimento de imaginação, que ele imaginou o experimento do elevador caindo com ele dentro.

P. Galileu fazia esse tipo de experimento?

Eu creio que não... Fez! do navio em movimento.

Queda da pedra no navio em movimento.

Essa última sequência de declarações de **A1** poderia ser encerrada com chave de ouro: Galileu e Einstein fizeram experimentos de pensamento. Uma análise apressada poderia conduzir à conclusão de que o estudante rompeu com a concepção empírico-indutivista. No entanto, a parte final de seu depoimento revelou uma interessante surpresa.

P. A observação e o relato experimental eles são puros, imparciais, ou eles estão carregados de teoria?

A1. Carregados de teoria.

P. Quando Galileu olha pelo telescópio, vê algumas coisas e relata, escreve. Tem teoria naquilo?

Não. Porque ele fez uma observação.

P. Há carga teórica naquelas observações ou elas são isentas?

São isentas.

P. São isentas, então?

São observações novas.

Esses últimos trechos revelam com clareza que a concepção empírico-indutivista ainda exerce uma considerável influência sobre o estudante. As declarações do estudante sugerem que esta concepção se revela mais acentuada em relação à observação, pois em relação à experimentação **A1** se revelou mais crítico. De qualquer forma, esses vestígios da concepção empirista não obscurecem os significativos avanços do estudante em direção a uma compreensão mais em sintonia com as posições epistemológicas contemporâneas.

É importante salientar que, embora os demais estudantes não tenham revelado uma contradição tão explícita, houve um consenso de que a concepção empírico-indutivista ainda era muito forte e que nem sempre era fácil identificá-la nos textos.

Analisando-se agora, com os dados das entrevistas, o desempenho dos alunos na Categoria 1, chega-se à conclusão de que estes fizeram um considerável esforço de reflexão crítica e alcançaram uma razoável compreensão acerca da relação teoria-observação/experimento. Se não se pode afirmar que eles superaram a concepção empírico-indutivista, pode-se, contudo, sustentar que houve um expressivo enfraquecimento desta concepção. Os estudantes já não aceitam de forma passiva e acrítica os argumentos empírico-indutivista explícita ou implicitamente contidos nos manuais científicos, livros e documentários de divulgação científica.

Embora a investigação não tenha como foco os modelos de ensino, a experiência didática, em ambas as fases da intervenção forneceu, indicativos que o modelo de perfil conceitual (MORTIMER, 2000) é mais adequado para analisar a situação. Neste caso, ficou evidente os limites do modelo de mudança conceitual (POSNER et al., 1982), sobretudo porque a concepção empirista foi aprendida pelos estudantes ao longo da experiência escolar - na educação básica e superior.

Uma avaliação equilibrada do desempenho do conjunto dos estudantes seria a de que **A4** e **A7** superaram a concepção empírico-

indutivista ou estão bem próximo de fazê-lo, enquanto os estudantes intermediários (**A1**, **A2**, **A3** e **A5**) encontram-se em um momento de transição – superaram o estágio de empiristas ingênuos, contudo ainda não se libertaram do jugo do empirismo-indutivismo.

Categoria 2

Nesta categoria, constatou-se que, nas respostas ao questionário, apenas um aluno obteve um desempenho considerado Insuficiente (**A6**); três alunos foram classificados como Regular (**A1**, **A2**, **A3**) e três alunos evidenciaram um desempenho Bom (**A5**) ou Muito Bom (**A4** e **A7**). Esses dados sinalizam que o conjunto de alunos evidenciou uma boa compreensão acerca do caráter histórico da ciência, contrapondo-se assim à visão de ciência a-histórica e problemática, e à visão descontextualizada e socialmente neutra (GIL et. al, 2001).

Como na categoria anterior, os sujeitos **A4** e **A7** apresentaram um excelente desempenho. Os dados obtidos com as entrevistas confirmaram este resultado, permitindo-se afirmar que esses alunos não realizaram uma mera aprendizagem mecânica. O estudante **A6** evidenciou um fraco desempenho.

Entre os estudantes **A1**, **A2**, **A3** e **A5**, verificou-se que a **Questão 5b** não foi satisfatoriamente respondida por três deles. **A1** e **A3** não responderam a esta questão, e a resposta de **A5** se mostrou confusa, superficial e fora do contexto. A **Questão 8** não foi respondida por **A3**, mas obteve uma boa resposta de **A1** e **A5** que demonstraram uma compreensão acerca da historicidade da ciência incomum entre estudantes, professores de física e mesmo cientistas (EL HANI, 2007). Além disso, nessa questão, **A1** e **A5** conseguiram articular as suas reflexões sobre o caráter histórico da ciência ao ensino de física, um objetivo que também aparece na **Questão 5b** e que se encontra contemplado na Categoria 4, na qual ambas as questões reaparecem.

Em relação à **Questão 8**, convém lembrar que no documentário Einstein: Muito Além da Relatividade, que teve alguns episódios exibidos e discutidos em sala, e foi disponibilizado aos estudantes, o físico contemporâneo Michio Kaku, de forma entusiástica afirma: “Einstein estava 50 anos à frente de seu tempo”. Esta declaração mostra o peso da tradição a-histórica e a-problemática na formação científica dos estudantes, assim como a sua influência nos meios de divulgação científica. O peso dessa tradição, de certa forma, explica e minimiza o posicionamento equivocado ou omissivo de **A2**, **A3**, e **A6**. Todavia,

valoriza, em muito, as argumentações dos estudantes **A4** e **A7**, e principalmente, **A1** e **A5**.

Nas entrevistas, os estudantes **A4** e **A7** voltaram a confirmar os posicionamentos assumidos nos questionários, enquanto os depoimentos de **A1** e **A5** forneceram dados relevantes sobre como estão refletindo acerca da historicidade da ciência. A seguir, alguns desses trechos das entrevistas são apresentados.

O sujeito **A1**, ao ser questionado sobre como via a relação entre a ciência e o contexto histórico-cultural emitiu as seguintes opiniões:

A1. Talvez a ciência evolua a partir da necessidade né... que a pessoa se encontra, ou através de fenômenos que não é explicado, ele busca a forma de explicar, ou atualmente pelas tecnologias hoje que evolui conforme o período vai decorrendo.

P. Independentemente das ideias que estão circulando na cultura?

Tem relação, eles caminham juntos. A ciência evolui conforme a cultura vai evoluindo também, ou pela necessidade, que nem aconteceu nas navegações. Eles buscaram meios pra conseguir navegações que fossem mais distantes, (...) desbravar, o oceano né? no caso.

Em outro trecho, **A1** revelou a sua dificuldade em perceber as relações entre a ciência e o contexto histórico-cultural:

P. Você acha isso fácil? Perceber essas coisas?

A1. Não acho, acho que não... (me) Tirando como exemplo...

P. É difícil ver essas coisas?

É difícil porque a teoria, antes de fazer essa disciplina não tinha... não tinha essa visão também.

Na argumentação de **A5** foi especialmente significativo o seu posicionamento crítico em relação à neutralidade da ciência, onde o estudante construiu uma bela articulação entre as reflexões tecidas ao longo da intervenção didática e a temática desenvolvida em seu Trabalho de Conclusão de Curso.

P. Você está trabalhando com monitoramento ambiental?

A5. Sim

P. Como é que você imagina que determinados setores da sociedade podem receber o teu trabalho com o professor (o orientador)?

Alguns vão encarar como bom, para melhorar mesmo tipo assim: para ver, para não prejudicar tanto as pessoas, porque é mais em relação a isso né. Para outras pessoas isso vai cair como ruim, porque quanto mais a gente pesquisa e vai vendo que ali está poluindo, então eles vão ter que se adequar pra poluir menos. Pra eles vai prejudicar em certos aspectos, mas vai ajudar em outros.

P. Como é que você relaciona isso que você acabou de falar, com afirmações do tipo a ciência é neutra, objetiva. O conhecimento científico é verdadeiro?

Ela não é neutra e objetiva. Ela... tem outras... Ela é tomada por outros elementos externos né (...) ela não é uma ciência neutra.

A seguir o pesquisador perguntou a **A5** se ele conseguia perceber as injunções ou influências do contexto sócio histórico nos trabalhos de cientistas como Galileu, Newton e Kepler. A resposta de **A5** foi esclarecedora sobre a sua compreensão acerca do caráter histórico da ciência.

A5. É o Galileu, tipo assim: ele pensava né? a teoria dele era uma coisa, só que era totalmente em confronto com a Igreja, em confronto com o que as pessoas da época acreditavam.

A Igreja conhecia a teoria de Copérnico, mas eles usavam como artifício matemático, mas não aceitavam, [...] em relação a aceitar que o sol é o centro do universo né,... senão acabava..... Se a Igreja acreditava naquilo e para a Igreja, não sei como que é, colocava que a terra estava no centro do universo. Aí vem um lá, Copérnico e fala que o sol está no centro do universo. Então tudo aquilo que a Igreja acreditava, poderia ser mentira, né. Não era verdade.

Como se pôde perceber, o estudante relacionou uma questão sócio-científica atual (a questão ambiental) à ampla e controversa questão sócio-científica desencadeada pela emergência da teoria copernicana.

A argumentação de **A5** foi um bom exemplar dos frutos de sua participação no esforço dialógico de apreensão dos novos conhecimentos abordados em aula, pois evidenciou o estudante em pleno exercício do terceiro momento pedagógico – o de aplicação dos novos conhecimentos adquiridos (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002).

A análise das respostas ao questionário conjugada às respostas dos estudantes nas entrevistas permite avaliar que, com exceção de **A6**, os estudantes de modo geral desenvolveram uma boa compreensão acerca do caráter histórico da ciência.

Categoria 3

Apenas um estudante obteve um desempenho considerado Insuficiente (**A6**), os demais alcançaram os seguintes resultados: Regular (**A5**); Bom (**A2** e **A3**); e Muito Bom (**A1**, **A4** e **A7**).

Nas entrevistas realizadas os estudantes fizeram interessantes declarações relacionadas ao caráter provisório, mutável e inventivo do conhecimento científico. Revelando ainda, como pensavam o conhecimento científico antes da intervenção didática e como passaram a pensá-lo, a partir das discussões efetuadas no âmbito da experiência didática realizada.

Dentro desse espírito, vale destacar nas declarações de **A1**, a visão de conhecimento científico como pronto, acabado, definitivo e originado na observação, que lhe foi transmitida no ensino médio, e que, segundo ele, continuou a ser cultivada nas disciplinas científicas da graduação:

A1. [...] a maior parte do ensino médio se tem a ideia, a ideia de ciência é assim... A ciência é isso, isso nunca vai mudar. Pelo menos no período que eu estudei no ensino médio nunca, nunca colocaram na minha cabeça que a ciência pode estar mudando, aquilo lá não é definitivo.

P. E aqui no Curso de Graduação, antes dessa disciplina?

Tinha a mesma ideia. Até essa disciplina tinha a mesma ideia.

No depoimento de **A4** é significativo a sua percepção do papel da criatividade no trabalho científico e a compreensão de que o conhecimento científico não é imutável, “é algo em construção”.

A4. [...] Na minha visão não tinha abertura para assim, criatividade por parte dos cientistas [...]. Conhecimento científico é algo que está em construção.

Eu imaginava que o conhecimento científico seria algo comprovadamente certo, não estaria sujeito a mudanças, era aquilo e ponto final. Firmou como conhecimento científico é aquilo e não vai haver mudanças mais depois daquilo.

Na fala de **A5** merece destaque a sua crítica à visão do conhecimento científico como verdade, e de que a verdade científica está sujeita a mudanças em função do impacto de novas teorias.

A5. Não sei, mas o conhecimento científico, ele não é a verdade... ele pode tentar explicar o que ocorre na natureza, né? Ele tenta explicar, mas... aí tem que pensar até que momento a gente vai tomar isso como ... verdade.

Porque... pode ter outra teoria que prove... que se contrapõe com isso, pra surgir uma outra teoria que seria uma outra verdade, né? que seria a verdade. Então eu acho que ela sempre tá evoluindo, ela sempre tá... é... mudando. Que nem, tem a teoria com relação a certa coisa e aí daqui a uma época surge uma outra teoria. Que pra surgir outra teoria, ela se contrapõe com essa que já tinha... em alguns aspectos.

[...] O termo verdade não é definitivo não.

Em relação à contribuição da disciplina e da sequência didática no sentido de oportunizar uma visão de ciência que contemple o caráter provisório, mutável e inventivo do conhecimento científico os depoimentos dos estudantes **A1** e **A4** são especialmente significativos.

P. O que essa disciplina teve de diferente, em relação a essa ideia?

A1. Então, tem essa visão assim da ciência, que, que através da observação você não... não pode

levar a conclusões que isso vai acontecer assim, pra sempre. Pode ser no outro dia, dois dias, ela pode estar mudando.

A4. [...] eu pude perceber com o decorrer da disciplina que o conhecimento científico é algo que está em constante mudança (...). Isso não quer dizer que este conhecimento anterior não foi importante, mas chega a um ponto, como a Física Clássica, que vai surgindo novas coisas que não explica, aí é que surge um outro conhecimento; seria um novo paradigma.

É importante considerar que as questões que compõem a categoria são de caráter conceitual. E foram propostas com o objetivo de oportunizar ao estudante uma reflexão sobre os conceitos físicos, sob uma perspectiva histórica e epistemológica, fornecendo-lhe subsídios conceituais que lhe permitissem dialogar criticamente, construir e apreender o significado da visão epistemológica contemporânea de que os conhecimentos científicos são provisórios, mutáveis, sendo as teorias e conceitos científicos criações do intelecto humano. Avalia-se aqui que, sem uma compreensão mínima sobre a gênese dos conceitos físicos, o caráter provisório, mutável e inventivo do conhecimento científico, transforma-se em apenas um clichê na mente do estudante.

Os conceitos envolvidos nessas questões foram apresentados e discutidos em aula sob uma perspectiva não contemplada anteriormente no Curso de Física. Além disso, é importante enfatizar que os estudantes não tiveram, nas disciplinas científicas do Curso, nenhuma iniciação à Relatividade Geral. Assim, o primeiro contato - formal e real - que eles tiveram com os conceitos e os problemas que motivaram o desenvolvimento da gravitação einsteiniana foi feito na sequência didática desenvolvida pelo pesquisador, no âmbito da disciplina Evolução dos Conceitos de Física.

Dessa forma, considerando-se as respostas ao questionário e as argumentações nas entrevistas, avalia-se que o desempenho demonstrado pelo conjunto dos estudantes nesta categoria, forneceu indicativos de que houve e ainda está havendo uma transição de uma visão do conhecimento científico como pronto acabado e definitivo para uma visão mais flexível e equilibrada, em que o caráter provisório, mutável e inventivo do conhecimento científico deve ser pensado. Pode-se afirmar que os estudantes estão percebendo que o conhecimento não tem apenas a dimensão de produto, mas também de processo, o que, na

maioria das vezes, é velado nos manuais científicos (KUHN, 1996). Afinal, somente a história pode desvelar aspectos relacionados ao processo de produção do conhecimento científico, obscurecidos ou deformados pela tradicional lógica interna de textualização do saber a ensinar.

Ademais, a qualidade das respostas dos estudantes às questões conceituais do questionário fornece uma evidência empírica de um argumento defendido por muitos pesquisadores: o de que a história e a filosofia da ciência podem ser úteis ao processo e apreensão e refinamento dos conceitos (BATISTA, 2007; MARTINS, 2006).

Categoria 4

Nesta categoria, 3 estudantes obtiveram um desempenho considerado Insuficiente (**A2**, **A3** e **A6**); 2 alcançaram o nível Regular (**A1** e **A5**) e 2 conseguiram o resultado Muito Bom (**A4** e **A7**).

O mau desempenho de **A3** chamou a atenção do professor-pesquisador, pois o estudante não estabeleceu nenhuma relação entre as reflexões históricas e epistemológicas e o ensino de física. Levando em conta o desempenho do aluno nas demais categorias, avalia-se aqui que ele tinha condições de sair-se melhor nesta. No entanto, em várias discussões em sala de aula o pesquisador pôde perceber certa resistência do aluno ao debate embora tenha dado boas contribuições nas aulas em que se dispôs a participar. Todavia quando o foco das discussões se voltava para as possíveis contribuições da história da ciência ao ensino de física, o seu posicionamento sempre se mostrou extremamente cético. Assim, é bem possível que o estudante simplesmente tenha se recusado a responder as questões, explicitando dessa forma à sua rejeição ao possível uso da história da ciência no ensino de física.

O desempenho de **A2** também foi uma surpresa para o professor-pesquisador. Esse aluno desenvolveu em seu TCC o tema das concepções espontâneas entre os alunos da educação básica, e durante as aulas sinalizou interesse nas questões históricas. No entanto, apenas na **Questão 9** ele fez uma articulação da história da ciência ao ensino de física. Não foi possível entrevistar o estudante, mas é possível que as suas declarações fornecessem melhores indícios de sua compreensão sobre o uso da história da ciência no ensino de física, como chegou a sugerir a sua resposta à questão acima assinalada.

O desempenho alcançado por uma parcela significativa dos alunos sinaliza que, de certo modo, as questões históricas e

epistemológicas passaram a integrar as suas reflexões sobre o ensino de física – um dos objetivos almejados com a intervenção didática.

As entrevistas realizadas forneceram informações adicionais sobre as percepções dos estudantes acerca do uso dos documentários nas aulas, o papel da história e da filosofia da ciência no ensino de física, e algumas das dificuldades enfrentadas na experiência didática. Alguns trechos significativos desses depoimentos são apresentados a seguir.

Em relação ao uso dos documentários, pôde-se perceber que eles foram bem recebidos pelos alunos e, de certa forma, aguçou a curiosidade deles em relação à teoria da relatividade e à emergência de uma nova gravitação, estimulando-os à leitura e à discussão dos textos. Por exemplo, ao explicar por que achou o documentário sobre Einstein interessante, o estudante **A1** explicou:

Talvez seja pela curiosidade. Eu esperava encontrar uma forma de entender mais ou menos sobre a teoria dele, como é que foi formulada, essas coisas, qual que foi o principal motivo para ele formular essa teoria [...] Levantou uma curiosidade...

No entanto, o que se mostrou mais relevante nessa receptividade dos estudantes a esse recurso didático foi a demonstração de um espírito crítico em relação ao uso de documentários no ensino de física. Em sintonia com os posicionamentos assumidos ao responder os questionários, os estudantes deixaram claro que o professor deve estar atento às possíveis deformações na história da ciência e também ao reforço da imagem dos cientistas como gênios isolados do mundo e à frente de sua época.

Em relação à imagem do cientista como um herói, um ser sobre-humano, o estudante **A1** revelou a seguinte percepção sobre os documentários: “Pra mim parece que reforça a ideia que ele fez tudo sozinho”. Uma percepção semelhante foi externada por **A5**: “Não é uma pessoa comum. Parece que o cientista ele não é uma pessoa normal que nem nós, né? Acho o que o documentário passa é isso”.

Ao ser questionado sobre o uso dos documentários sem uma discussão sobre os mesmos **A4** foi taxativo: “Sem uma discussão?... Bom, para começar eu acho que esses documentários, eles reforçam; claro, eu enfoquei nisso no curso inteiro [...] eu acho que os documentários reforçam a ideia de gênios”.

O posicionamento de **A7** se deu na mesma direção:

A7. Quando é discutido os problemas dos próprios documentários, e acompanha uma teoria legal assim, vários pontos de vista diferente que fica fácil você identificar os problemas, fica legal entendeu? Por exemplo, só o documentário é pouco, só o livro é pouco, entendeu? mas aí você confronta um com o outro, você tem condições de julgar melhor as posturas, a forma como um é produzido, a forma como um é escrito.

P. Você acha que se deve chamar a atenção para isso?

É, e foi chamado.

O papel do professor no uso crítico dos documentários também foi salientado por **A5**:

[...] eu acho que é importante, que nem eu falo, é passar ele e debater, comentar, se o professor vê falha, vê alguma que é contrária né as teorias, é só comentar, falar que não é daquela forma que o documentário está colocando, em artigos científicos isso é diferente, na história. Porque aqui é um vídeo falando, um texto falando sobre a vida de Einstein. Eles tentam colocar todas as teorias no DVD, mas não é porque é um vídeo que não vai ter falhas né. Pode algumas teorias estar meio equivocadas.

É importante salientar, no entanto, que, apesar da postura crítica, os estudantes fizeram um bom uso dos documentários, principalmente no processo de apreensão do princípio de equivalência e da gravitação einsteiniana como decorrente da deformação-espaço tempo, o que pôde ser percebido nas respostas ao questionário e também nas entrevistas, conforme evidenciam as falas dos estudantes **A1** e **A7**.

A1. A equivalência me chama muito a atenção na queda do elevador, que eu já havia comentado antes, e com o foguete. Um experimento que ele experimentou mentalmente, pode-se dizer assim né?

A7. [...] Tem esse documentário aqui, entendeu, foi uma coisa legal, um recurso visual que ajudou. Tipo assim: se você alcançasse a velocidade da

luz o que que você teria que ver, né? Vê ela parada, mas ela está oscilando. E aí então, fica complicado. Foi legal assim, os dois trazem o negócio do elevador, eu acho, não estou lembrado direito. O recurso do elevador também é interessante.

P. O recurso do elevador permitiu a melhor compreensão do texto?

A7. Permite, permite. Se bem que o que mais me ajudou foi o artigo, né?

A análise das respostas dos estudantes, no questionário e nas entrevistas, em relação ao uso dos documentários, permite afirmar que, de modo geral eles estabeleceram um bom diálogo com esse tipo de recurso didático. Pôde-se perceber que no diálogo textos-documentários-professor-aluno, os documentários, de modo diferenciado para cada aluno, foram contemplados os três momentos pedagógico do processo dialógico: o de problematização, o de organização e o de aplicação do conhecimento, ilustrando muito bem que esses momentos não podem ser encarados como etapas estanques do processo de apreensão do conhecimento (DELIZOICOV, 2001).

A percepção dos estudantes de que os documentários devem ser analisados criticamente pelo professor e discutidos com os alunos fornece uma boa evidência de que a história e a filosofia da ciência podem oferecer ao futuro docente instrumentos intelectuais que lhe permitam exercer o que Chevalard (2005) chama de “princípio de vigilância epistemológica” sobre o processo de transformação dos saberes.

Com relação às dificuldades encontradas pelos estudantes, o pesquisador avalia que a principal delas esteve relacionada à prática da leitura. É importante destacar que o desenvolvimento da sequência didática foi norteado por uma perspectiva dialógica, na qual o estudante era sistematicamente instigado a se posicionar e expor os seus questionamentos.

Com exceção do estudante **A7**, pôde-se perceber que não foi fácil para os demais alunos a adaptação a esse tipo de aula, pois isto exigia deles um permanente compromisso com a prática da leitura. Compromisso este que nem sempre os estudantes conseguiram cumprir a contento, como deixou claro o estudante **A1**. Isto se deveu não apenas à falta de hábito de leitura, mas também em função de diversos compromissos acadêmicos dos estudantes, alheios à disciplina. Como

observou muito bem **A7**, cada um dos participantes elegeu as suas prioridades, e nem sempre estas incluíam a disciplina de Evolução dos Conceitos de Física – muitas vezes vista como “perfumaria”, não apenas por estudantes como por muitos professores do Curso.

Em relação às dificuldades relacionadas à leitura, o depoimento de **A4** foi esclarecedor:

P. Que dificuldade você teve nesta disciplina?

A4. Leitura e interpretação do texto. Eu nunca fui acostumada a fazer esse tipo de aula, de estar discutindo. Muitas vezes era chato ter que, e é boa essa disciplina porque acaba forçando uma maneira de lê. É um grande problema. Leitura, interpretação e você tem um professor que está na sala de aula te chamando para a discussão, tá sempre instigando no que a gente tem que ficar ligado, é interessante.

A explicação do estudante **A5** externa o seu tipo de dificuldade com os textos.

A5. A gente lia os textos, tipo assim: aqui na faculdade que é tudo, a gente já aceitava que nem os livros aí, já aceita como verdade, ou a teoria que tudo surge do experimento, tudo surge da observação, aqui não. Com essa teoria a gente vê que é diferente. Que as experiências, não sei, ela surge de uma teoria. Para ler os textos, eu sempre li os textos assim, tomando como verdade.

P. Isso causa conflitos em tua cabeça? .

Causa.

P. Você ainda tem algumas dúvidas sobre isso?

Sim, bastante.

P. Você ainda teria interesse em ler textos nessa direção ou acabou aí.

Tenho. Que nem eu falei para o professor, se abrir a Pós, eu quero fazer, pra mim continuar, porque eu tenho muita dificuldade, mas eu quero, cada vez tentar aprender, pra mim ver, tentar acabar com a dificuldade.

Cabe observar que a declaração de **A5** evidencia uma dificuldade e uma postura diante do conteúdo escrito nos textos que não é apenas sua, mas que é compartilhada por grande parte dos estudantes do Curso.

Em síntese, este problema transcende o âmbito da disciplina, mas teve que ser enfrentado pelo pesquisador. E se por um lado fornece um indicativo dos limites impostos à intervenção didática, por outro revela uma efetiva contribuição deste trabalho à formação dos estudantes.

Em relação à articulação entre a história e a filosofia da ciência e o ensino de física, os depoimentos de **A4**, **A5** e **A7** foram muito interessantes, pois revelaram que os estudantes estabeleceram conexões entre as questões históricas e epistemológicas discutidas em aula e o ensino de física.

A4. A física e o ensino? Eu como professora de Física, eu não posso ter uma ideia equivocada do conhecimento científico, algo provado e terminado que eu vou acabar passando para os meus alunos, né?....

A5. É interessante professor essa, esse conhecimento, né? do texto do começo para a gente entender da onde está saindo as teorias, o surgimento delas, o que aconteceu, a época em que elas estavam envolvidas...

A7. Fundamental, fundamental. Eu acho que seria uma questão merecedora de uma abordagem maior, porque ela permite você enxergar melhor os problemas que os caras viviam na hora de desenvolver aquilo lá, entendeu?

Quando questionados, se os temas históricos e filosóficos deveriam ser trabalhados na graduação, os estudantes se mostraram favoráveis. **A5** apontou a necessidade de história da física não aparecer apenas no quarto ano, e o conflito entre a disciplina de Evolução dos Conceitos de Física e as disciplinas anteriores do Curso.

A5. Deveria mais, né?

P. Você acha isso?

Eu acho, porque a gente vai ver a história. Na minha graduação, a gente viu tudo antes né. E ai chega no quarto ano é que você vê a história da física. Se tivesse uma sequencia disso antes, ou

visse junto né, alguma matéria que vai mostrando, seria melhor, porque agora você vê tudo de uma forma, aí você chega no quarto ano e vê uma teoria de Evolução dos Conceitos de Física, bem aí você vai bater de confronto com o que você aprendeu né.

Em relação ao conflito entre a disciplina de Evolução e as demais disciplinas do Curso, o pesquisador comentou com o estudante que a história da física poderia ser abordada em uma perspectiva que estivesse em sintonia com aquilo que é colocado nos manuais. A seguir pediu que **A5** falasse que tipo de história ele considerava mais interessante para o aluno e para o ensino de física. A resposta do estudante foi significativa.

A5. A evolução mostrando [...] mostrando do jeito em que a gente viu mesmo, porque lá a gente vê a evolução mostrando que a experiência, as teorias não surgem unicamente do experimento, da experiência. Essa evolução, a gente mostrando isso, ao longo do curso.

Convém salientar que apesar da receptividade demonstrada pelos estudantes em relação ao uso da história da ciência no ensino de física, eles não deixaram de assinalar alguns problemas inerentes a esta iniciativa. Por exemplo, a carga horária dos professores nas escolas, e a pressão para que os professores cumpram a ementa, como assinalaram os estudantes **A1** e **A4** que declarou:

A4. Só que o problema de levar para a sala de aula, eu já penso assim como professora, seria o tempo disponível porque em sala de aula você tem uma ementa a seguir. [...] Aí você imagina, mas eu quero inferir a história da física, mas vai dar conta da ementa? [...] É a visão conteudista.

Os estudantes destacaram também o problema da formação do professor, deixando claro que a tarefa de articular as questões históricas e epistemológicas ao ensino de física não é uma tarefa trivial; como declarou **A5**, “... a gente tem que estudar, ter vontade, tem que tentar levar, mas tem que levar, né? Não é fácil tem que estudar. É difícil”.

Nessa questão da formação do professor, o depoimento de **A4** revelou um agudo senso crítico.

A4. O problema é que há uma imaturidade no ensino médio por parte dos alunos, eu imagino.

P. Só os alunos é que tem problemas?

Professor também, eu não me considero preparada tendo uma disciplina durante os meus 4 anos que trate sobre as questões filosóficas da ciência, eu não me sinto preparada para ir numa sala de aula e discutir todas essas questões aqui com os meus alunos.

Se tem uma imaturidade por parte dos alunos, tem uma falta de conhecimento de minha parte. As questões históricas e filosóficas, porque imagina: uma disciplina durante um ano inteiro com uma carga horária de 2 horas semanais, não dá para se aprofundar em tudo.

O estudante **A7**, ao responder se achava fácil articular ao ensino de física um enfoque histórico e epistemológico, foi incisivo: “Fácil? Não tem ninguém formado para dar um tipo de aula dessa! Eu não estou formado para dar um tipo de aula dessa”. A declaração de **A7** sintetiza a percepção do grupo. A fala de **A7**, assim como a de **A4** apresentada mais acima, encontra eco nas considerações tecidas por André Martins, ao avaliar os obstáculos que o licenciado encontra ao tentar levar à história da ciência ao ensino médio – sem dúvida, “há muitas pedras no caminho” (MARTINS, A. 2007).

Não obstante o seu posicionamento crítico, **A7** reiterou o seu posicionamento favorável ao enfoque adotado na disciplina de Evolução: “Se eu estivesse saído do curso sem esta disciplina teria muita confusão na cabeça e coisa errada, hein. Ia ser muito parcial, né”.

No que diz respeito à avaliação do desempenho dos estudantes na categoria, chegou-se, a partir da análise das respostas ao questionário e das entrevistas realizadas, à conclusão de que uma parcela significativa dos estudantes desenvolveu uma boa reflexão crítica e conseguiu estabelecer uma articulação entre as discussões históricas e epistemológicas desenvolvidas no módulo didático e o ensino de física. Isto sinaliza que os estudantes desenvolveram consideravelmente a compreensão de que a história e a filosofia da ciência podem, efetivamente, ser um instrumento de reflexão e ação didático-pedagógica do professor no ensino de física.

A análise do desempenho geral dos estudantes nas quatro categorias delineadas revelou que, de modo geral, houve um significativo avanço na compreensão dos aspectos da natureza da

ciência priorizados na intervenção didática, assim como da articulação dessa compreensão à reflexão e ação do professor no ensino de física.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O intento de apresentar as conclusões deste trabalho exige a retomada da questão que norteou todo o esforço reflexivo empreendido em sua construção e implementação: em um curso de Licenciatura em Física, uma proposta de ação didático-pedagógica fundamentada nas reflexões contemporâneas da história e filosofia da ciência pode, na disciplina *Evolução dos Conceitos de Física*, contribuir para desenvolver nos licenciandos uma melhor compreensão da natureza da ciência e do processo histórico de construção das teorias e conceitos científicos, integrando esta compreensão à sua reflexão sobre o ensino de física?

Em primeiro lugar, é preciso destacar que este trabalho corrobora o que uma parcela significativa da área de ensino de ciência vem assinalando já há algum tempo: que a história da ciência, articulada à algumas das reflexões epistemológicas contemporâneas, tem a potencialidade educativa de contribuir para: (i) a humanização das ciências, compreendendo-a com uma construção historicamente determinada; (ii) tornar as aulas de ciências mais estimulantes e desafiadoras, possibilitando o desenvolvimento de habilidades de raciocínio e pensamento crítico; (iii) promover uma compreensão mais profunda e adequada dos conteúdos científicos; (iv) melhorar a formação dos professores, proporcionando-lhes subsídios para desenvolver um entendimento mais rico da ciência ao desvelar as suas múltiplas dimensões (intrínseca, histórica, filosófica e cultural); (v) auxiliar os professores a identificar e compreender melhor as dificuldades de aprendizagem dos alunos, ao alertar para as dificuldades históricas no desenvolvimento dos conceitos científicos; (vi) proporcionar uma melhor apreciação acerca dos debates educacionais da atualidade (MATTHEWS, 1995).

Em contrapartida, outras considerações da área também foram evidenciadas, tais como o peso da concepção empírico-indutivista na estrutura cognitiva dos estudantes e as dificuldades de enfrentamento desta questão no âmbito de uma única disciplina (GASTAL; RESENDE, 2004; SCHEIT, 2006).

A apreciação das possíveis contribuições do trabalho de intervenção didática se iniciará por uma reflexão sobre o desempenho dos estudantes nos questionários aplicados ao final de cada fase da intervenção. A seguir, esta primeira apreciação é complementada e repensada à luz da análise dos dados advindos das entrevistas e das observações do professor-pesquisador.

O quadro 11, apresentado abaixo, sintetiza o desempenho individual dos estudantes nos dois questionários aplicados.

Quadro 11 - Desempenho geral da turma

Nível de Desempenho	Categoria 1		Categoria 2		Categoria 3		Categoria 4		Desempenho Geral	
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
Muito Bom	A4 A7	A4 A7	A2 A7	A4 A7	A1 A4 A7	A4 A7	A4 A7	A4 A7	A4 A7	A4 A7
Bom	A1 A2	A5	—	A5	A3 A5	A2 A3	A3	—	—	—
Regular	A5 A6	A2 A3	A1 A2 A3 A5	A1 A2 A3	A1 A4	A5	A1 A5	A1 A5	A1 A2 A3 A5	A1 A2 A3 A5
Insuficiente	A3	A1 A6	A6	A6	A6	A6	A2 A6	A2 A3 A6	A6	A6

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

A configuração dos níveis qualitativos de desempenho ali assinalada, considerada de forma isolada, sugere que o desempenho geral de cada estudante foi o mesmo em ambos os questionários. Passando-se à visualização desses níveis em cada uma das categorias de análise, a comparação entre os níveis qualitativos alcançados em cada um dos questionários sugere algumas semelhanças e diferenças no desempenho individual dos estudantes nos distintos momentos da experiência didática.

Atendo-se à Categoria 1, verifica-se que no primeiro questionário apenas o aluno **A3** apresentou um desempenho considerado Insuficiente, enquanto que, no segundo questionário, este nível foi atribuído a dois alunos, **A1** e **A6**. No entanto, mais importante do que esta diferença quantitativa é observar os aparentes avanços, declínios, ou manutenção de desempenho dos estudantes, sugeridos pela comparação dos níveis qualitativos auferidos em ambos os questionários. Por exemplo, o estudante **A1** aparentemente teve um acentuado declínio de desempenho ao apresentar os níveis Bom e Insuficiente nos 1º e 2º questionários, respectivamente; **A2** teve um leve declínio com os níveis Bom e Regular; sendo seguido por **A6** (Regular e Insuficiente). Em contrapartida, **A5** sinalizou um crescimento, ao sair do nível Regular para o Bom. Quanto aos alunos **A4** e **A7**, estes mantiveram o desempenho Muito Bom.

Na Categoria 2, a maioria dos estudantes apresentou um desempenho satisfatório nos dois questionários; apenas o aluno **A6** evidenciou um desempenho Insuficiente em ambos. O estudante **A5** sinalizou um avanço em sua compreensão sobre caráter histórico da ciência, ao ascender de um nível de reflexão e compreensão considerado Regular no primeiro questionário, para um nível considerado Bom no segundo. Os demais estudantes evidenciaram os mesmos níveis de desempenho em ambos os questionários, três mantiveram o nível Regular (**A1**, **A2** e **A3**) e dois apresentaram o nível Muito Bom (**A4** e **A7**).

Na Categoria 3, apenas o estudante **A6** revelou um desempenho Insuficiente em ambos os questionários, de forma que os demais alunos da turma demonstraram uma compreensão satisfatória acerca do caráter provisório, mutável e inventivo do conhecimento científico em ambas as fases da intervenção. Entres estes, houve alguns indícios de relativo crescimento, declínio e estabilidade no desempenho. Por exemplo: **A1** e **A4** ascenderam do nível Regular, no primeiro questionário, para o nível Muito Bom no segundo; **A2** e **A5** tiveram um leve declínio no segundo questionário pois **A2** se deslocou do nível Muito Bom para o nível Bom,

enquanto que **A5** alcançou os níveis Bom e Regular no primeiro e segundo questionário, respectivamente; o estudante **A7** manteve-se estável, apresentando um desempenho Muito Bom nas duas fases da intervenção.

Na Categoria 4, os níveis de desempenho apresentados em ambos os questionários exibiram uma maior dificuldade dos estudantes em articular as reflexões histórico-epistemológicas ao ensino de física desenvolvidas em aula. No primeiro questionário houve dois alunos com um nível de desempenho Insuficiente (**A2** e **A6**), ao passo que, no segundo, houve três alunos com este resultado (**A2**, **A3** e **A6**), apesar de **A3** no primeiro questionário ter alcançado um nível de desempenho considerado Bom. Os demais estudantes alcançaram os mesmos níveis de desempenho em ambos os questionários: dois alunos mantiveram o nível Regular (**A1** e **A5**) e dois apresentaram o nível Muito Bom (**A4** e **A7**).

Em relação à totalidade de cada um dos questionários, os níveis qualitativos apresentados no quadro 11 sugerem que, em ambas as fases da intervenção didática, com exceção do estudante **A6**, o conjunto dos estudantes deu indicativos de um desempenho satisfatório. Em ambos os questionários houve 4 alunos que alcançaram um nível geral de desempenho considerado Regular (**A1**, **A2**, **A3** e **A5**) e 2 alunos que obtiveram o nível Muito Bom (**A4** e **A7**).

A análise das respostas aos questionários, sem dúvida, forneceu indicativos do desempenho individual dos estudantes na totalidade das questões e em cada uma das categorias de análise.

O fato de ambos os questionários serem uma das formas de avaliação da disciplina e terem sido respondidos sem nenhuma fonte de consulta, de certo, criou entre os estudantes a habitual “pressão da avaliação”, o que pode ter inibido ou influenciado as respostas de alguns alunos. Todavia, avalia-se aqui que, de forma geral, os efeitos deste procedimento foram positivos, pois atribuiu aos estudantes uma maior seriedade à tarefa de leitura dos textos, o que conferiu às suas respostas um razoável nível de confiabilidade. Este atributo, possivelmente, não seria obtido se os questionários fossem respondidos com consulta, pois uma parcela expressiva dos alunos tenderia a, simplesmente, copiar nos textos aquilo que considerassem ser a resposta adequada, comprometendo assim a análise empreendida.

Não se deve esquecer, conforme declararam os estudantes nas entrevistas, que a prática sistemática de uma leitura reflexiva foi poucas vezes estimulada ao longo do Curso. Assim, a opção pela aplicação do questionário na forma acima assinalada revelou-se uma solução

adequada e segura, em face de um contexto acadêmico – nos níveis docentes e discentes – em larga medida, refratário e até adverso à leitura e discussão de textos de natureza histórica e epistemológica, na perspectiva delineada e implementada na disciplina de Evolução dos Conceitos de Física e, principalmente, na intervenção didática.

Dessa forma, se, por um lado, o desempenho apresentado pelos estudantes forneceu indícios de que o trabalho de intervenção contribuiu para que eles desenvolvessem uma reflexão crítica e uma melhor compreensão acerca dos aspectos conceituais, históricos e epistemológicos contemplados nas categorias de análise, por outro, a análise isolada das respostas aos questionários é insuficiente para avaliar de forma mais aguda as possíveis contribuições da intervenção didática.

Uma avaliação equilibrada das possíveis contribuições da intervenção deve, forçosamente, passar por uma reflexão crítica e uma análise do processo didático-pedagógico vivenciado, em diferentes perspectivas, pelo educando e pelo educador. As limitações, receios e resistência ao desenvolvimento da proposta, sinalizados pelo aluno concreto, real, foram um permanente desafio à reflexão e à ação didático-pedagógica do professor-pesquisador - este também, limitado e real.

Dentro desse espírito, tomando como referência as categorias de análise, uma avaliação dos possíveis progressos efetuados pelo estudante deve contemplar, em linhas gerais, o seu percurso do nível de compreensão em que se encontrava ao iniciar a disciplina Evolução dos Conceitos de Física até o estágio em que chegou ao fim do trabalho de intervenção didática.

A análise dos dados advindos das entrevistas forneceu indícios de que esta trajetória intelectual foi marcada pelo conflito entre as reflexões históricas e epistemológicas desenvolvidas, principalmente, no âmbito da experiência didática e as antigas concepções sobre a história e a natureza da ciência fortemente arraigadas na estrutura cognitiva do estudante. Dentre estas se destacava a concepção empírico-indutivista sintetizada na visão tradicional do método científico. Conforme reconheceram os estudantes, esta concepção vinha sendo, implícita ou explicitamente, apreendida desde a educação básica, e, de forma geral, foi cultivada e reforçada na maior parte das disciplinas do Curso.

Outras visões ou imagens de ciência tais como a visão a-problemática e a-histórica e a visão descontextualizada e socialmente neutra da ciência nos moldes caracterizados por Gil e colaboradores (2001), também compunham as concepções prévias dos estudantes. Estas visões foram tacitamente transmitidas ao longo da formação do

estudante pela ausência de discussões relativas à historicidade da ciência, uma característica da tradição de ensino dogmática, a-histórica e a-problemática, ainda presente nos curso de física, inclusive os de licenciatura.

Além do conflito no plano histórico-epistemológico, as declarações dos estudantes apontaram para outros problemas vivenciados ao longo da experiência didática tais como: a não valorização da discussão dos conceitos em várias disciplinas científicas, ainda que de forma estritamente internalista; a presença de lacunas conceituais nessas disciplinas, principalmente em relação ao conteúdo relacionado à gravitação newtoniana; a pouca afinidade dos alunos com a prática da leitura reflexiva e problematizadora; e o relativo receio, e até a resistência velada, de alguns alunos, ao desenvolvimento de uma proposta didático-pedagógica balizada pela dialogicidade e pela problematização.

Em relação ao exercício da dialogicidade e da problematização, os estudantes indicaram um conflito entre o status adquirido em uma proposta dialógica e aquele ao qual estavam habituados nas aulas tradicionais. Os alunos rapidamente perceberam que este tipo de aula exigia de cada um deles o desenvolvimento de uma nova postura discente, distinta da postura passiva, às vezes, assumida na situação relativamente confortável das aulas expositivas tradicionais.

Convém salientar que uma aula expositiva pode ser permeada pela dialogicidade, pode ser convidativa à reflexão do estudante e ao diálogo problematizador. Contudo, a ausência de discussão conceitual em algumas disciplinas científicas, desenvolvidas através de aulas expositivas, fornece indícios de que nem sempre essas aulas estimulavam o estudante à reflexão, à pergunta ou ao questionamento. Havendo, mesmo, situações em que a pergunta e o questionamento eram, de forma velada ou explícita, simplesmente cerceados.

Dessa forma, a condução da proposta didática em sala de aula passou pelo permanente desafio de compreender os problemas e limitações do estudante, e, ao mesmo tempo, dialogar criticamente com esta situação, procurando estimular nos estudantes a curiosidade epistemológica, o hábito da leitura reflexiva e o exercício da pergunta, do questionamento. Em suma, fez-se necessário valorizar e estimular o desenvolvimento de hábitos e atitudes intelectuais que, de forma geral, foram colocados em segundo plano na formação do estudante. Buscando inspiração em Kuhn (1996), poder-se-ia afirmar que os estudantes atuavam sob um paradigma de ensino (e aprendizagem) e teriam agora que atuar na perspectiva de outro.

Cabe destacar que, apesar do Curso de Física ser de Licenciatura, até recentemente, um rápido exame em sua estrutura curricular já permitia caracterizá-lo como tendo um perfil mais próximo ao de um Bacharelado. Esta característica só foi substantivamente modificada em 2010, após sucessivas críticas das comissões avaliadoras. Assim, o histórico do Curso, e o perfil da maioria dos professores das disciplinas científicas, de certo modo, torna compreensível a desvalorização de atividades, hábitos e atitudes fundamentais à formação do professor.

Convém assinalar também que a disciplina Evolução dos Conceitos de Física existe desde a criação do Curso e sua ementa sinaliza uma aproximação com a filosofia da ciência. Entretanto, no que concerne ao saber ensinado, o primeiro esforço sistemático de articular a disciplina a algumas das reflexões epistemológicas contemporâneas foi efetuado no ano de 2010. O professor regente da disciplina foi também o condutor do presente trabalho de pesquisa e desenvolveu a experiência didática aqui analisada.

Retornando à análise da intervenção, falou-se que uma avaliação equilibrada de suas possíveis contribuições deveria considerar o percurso intelectual do estudante ao longo da experiência.

A análise das respostas aos questionários forneceu indicativos nessa direção, ainda que incompletos, conforme foi assinalado. Esses indicativos ganharam maior consistência e relevância após a análise das declarações dos estudantes em ambas as entrevistas.

É a partir dessas declarações, às vezes singelas e com certa hesitação, outras vezes sofisticadas e incisivas, que se pode ter uma melhor compreensão dos progressos efetuados por esses alunos, na compreensão dos aspectos epistemológicos contemplados nas Categorias 1, 2 e 3; e da articulação dessa compreensão às suas reflexões sobre o potencial educativo da história e filosofia da ciência no ensino de física - objetivo contemplado na Categoria 4.

Além disso, para que esses progressos fossem efetuados os estudantes tiveram que aprender: a ler os textos utilizados de forma reflexiva; a assistir os documentários atentos à apresentação das teorias e conceitos físicos, ao uso das metáforas e analogias na explicação destes e à invenção dos objetos didáticos no processo de transposição didática do saber sábio para o saber a ensinar; além de atentarem para as simplificações e deformações da história da ciência, bem como, as mistificações do cientista, muitas vezes presente nos meios de divulgação científica.

Desta forma, a análise dos dados forneceu indicativos de que a intervenção didática contribuiu para que os estudantes desenvolvessem

uma melhor compreensão acerca dos aspectos da natureza da ciência priorizados no trabalho, assim como a sua articulação ao ensino de física. No entanto, evidenciou-se também a vitalidade da concepção empírico-indutivista na estrutura cognitiva dos estudantes, indicando que um empreendimento como este não pode ser feito em uma única disciplina, mas deve ser negociado no curso, no sentido de se tornar uma preocupação coletiva no processo de formação dos futuros professores.

Nessa perspectiva, é importante reconhecer que, apesar das pesquisas e documentos oficiais exibirem um estudo contextualizado da ciência, recuperando-a como produção humana historicamente determinada, o desafio para perseguir este objetivo na educação básica, e também na superior, é enorme. As dificuldades dos estudantes de física, futuros professores, para transporem concepções há muito superadas no âmbito da discussão teórica, evidencia a dimensão deste desafio.

A constatação coloca uma questão importante no âmbito da formação inicial: a forma de organização do trabalho didático no âmbito da universidade tem contribuído para preparar os futuros professores nessa direção?

De qualquer modo, se, por um lado, a experiência didática evidenciou que a inserção da história da ciência em um Curso de Física está sujeita aos limites e restrições impostos pela própria organização do trabalho didático e dos valores, concepções de ciência, ensino e aprendizagem a ela subjacentes, por outro, demonstrou que, mesmo em contextos como este, a história da ciência pode contribuir para a formação dos licenciandos ao promover uma compreensão da ciência como um empreendimento humano que, não obstante a sua lógica interna, tem uma dimensão histórica, filosófica e cultural, possibilitando-lhes articular esta compreensão ao processo coletivo de construção de um novo ensino de física na educação básica.

Concluindo, avalia-se aqui que a história da ciência, em uma perspectiva contextualista, dialógica e problematizadora, é um foco de resistência à tradição de um ensino de física dogmático e a-histórico e, ao mesmo tempo, um farol para novas possibilidades de se pensar o curso de Licenciatura em Física.

REFERÊNCIAS

ABRANTES, Paulo César Coelho. **Imagens de natureza, imagens de ciência.** Campinas, SP: Papirus, 1998 (Coleção Papirus ciência).

ALFONSO-GOLDFARB, Ana Maria. **O que é história da ciência.** São Paulo: Brasiliense, 2004.

ALFONSO-GOLDFARB, Ana Maria; FERRAZ, Márcia Helena Mendes; BELTRAN, Maria Helena Roxo Beltran. A historiografia contemporânea e as ciências da matéria: uma longa rota cheia de percalços. In. GOLDFARB, Ana Maria Alfonso; BELTRAN, Maria Helena Roxo. **Escrevendo a história da ciência, propostas e discussões historiográficas.** São Paulo: EDUC/Livraria Editora da Física/FAPESP, 2004, p.49-73.

ALLCHIN, Douglas. Pseudohistory and pseudoscience. **Science&Education**, v.13, n.3, p.179-195, 2004.

ALMEIDA, Maria José P.M. **Discursos da ciência e da escola: ideologia e leituras possíveis.** Campinas, SP: Mercado das Letras, 2004. p.95-114.

ANGOTTI, J.A.P. **Fragmentos e totalidades no conhecimento científico e no ensino de ciências.** Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

ASTOLFI, Jean-pierre; DEVELAY, Michel. **A didática das ciências.** 12ª ed. Campinas: Papirus, 2008.

BACHELARD, Gaston. **O racionalismo aplicado.** Rio de Janeiro: Zahar, 1977.

BACHELARD, Gaston. **A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento.** Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

BACHELARD, Gaston. **O novo espírito científico.** 3. ed. Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 2000.

BACON, Francis. **Nova Atlântida**. 4ª ed. São Paulo: Nova Cultural, 1988 (Os pensadores).

BALDINATO, José Otávio; PORTO, Paulo Alves. Variações da história da ciência no ensino de ciências. In: **VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**, 2007, Florianópolis, SC, Anais.

BARRA, Eduardo Salles de Oliveira. A metafísica cartesiana das causas do movimento: mecanicismo e ação divina. **Revista SCIENTIÆ studia**. São Paulo, v.1, n.3, p.299-322. 2003.

Disponível em:

http://www.scientiaestudia.org.br/revista/cont_01_03.asp

BASSO Cátia Andreza. **O Átomo de Bohr no Nível Médio: uma análise sob o referencial lakatosiano**. Florianópolis: UFSC, Pós Graduação em Educação Científica e Tecnológica. (Dissertação de Mestrado). 198 p., 2004.

BASTOS, Fernando. História da Ciência e pesquisa em ensino de ciências: breves considerações. In. NARDI, Roberto (org). **Questões atuais no ensino de ciências**. São Paulo: Escrituras Editora, 2002. (Educação para a Ciência).

BATISTA, Irinéa de Lourdes. O Ensino de teorias físicas mediante uma estrutura histórico-filosófica. **Ciência & Educação**, v.10. n.3, p.461-476. 2004.

BATISTA, Irinéa de Lourdes. Reconstruções histórico-filosóficas e a pesquisa em Educação Científica e Matemática. In. NARDI, Roberto (org). **A pesquisa em Ensino de Ciências no Brasil: alguns recortes**. São Paulo: Escrituras Editoras, 2007, p.257-272.

BEM-DOV, Yoav. **Convite à Física**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1996.

BERNAL, John D. **Ciência na história**. Lisboa: Horizonte, 1976. v. II, p. 367-402.

BERNAL, John D. **Historia social de la ciencia**. 7. ed Barcelona: Peninsula, 1997.

BOOGDAN Robert C; BIKLEN Sari Knopp. **Investigação Qualitativa em Educação**. Porto: Porto Editora. 1994.

BOULOS, PIERRE J. Newton's path to universal gravitation: the role of the pendulum. **Science&Education**, v. 15. p.577-595, Springer, 2006.

BRAGA, Marco; GUERRA Andréia; REIS, José Claudio. **Breve história da ciência moderna, v.2: das máquinas do mundo ao universo-máquina**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, Ed. 2004.

BRAGA, Marco; GUERRA, Andreia; REIS, José Cláudio. O papel dos livros didáticos franceses do século XIX na construção de uma concepção dogmático-instrumental do ensino de física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v.25, n.3, p. 507-522, dez. 2008.

BRAHE, Tycho. Carta de Tycho Brahe a Johannes Kepler em Graz. **Revista SCIENTIÆ studia** São Paulo, v. 2, n. 4, p. 567-74, dez. 2004. Disponível em http://www.scientiaestudia.org.br/revista/cont_02_04.asp

BRASIL. **LDB: Lei de diretrizes e bases da educação nacional: lei n.9.394, de 1996**. Brasília: [s.n], 1997 (Brasília: Secretaria Especial de Editoração e Publicações). 48p.

BRASIL. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio**. Brasília: MEC, 1999, 360p.

BRASIL. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **PCN+ ensino médio: orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais: ciências da natureza, matemática e suas tecnologias**. Brasília: MEC, SEMTEC, 2002, 144p.

BRASIL. Ministério da Educação, Conselho Nacional de Educação. **Diretrizes Curriculares para os Cursos de Física**. PARECER CNE/CES N 1304/2001, de 6 de novembro de 2001. Homologado em 4 de dezembro de 2001. Publicado no Diário Oficial da União de 7 de dezembro de 2001, Seção 1, p. 25. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES1304.pdf>.

BRASIL. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **PCN+ ensino médio: orientações educacionais complementares aos parâmetros**

curriculares nacionais: ciências da natureza, matemática e suas tecnologias. Brasília: MEC, SEMTEC, 2002, 144p.

BRUSH, Stephen G. Should the History of Science be Rated X? *Science*, v. 183, n. 4130, p. 1164-1172, March 1974.

BUARQUE, Cristovam. **Foto de uma conversa – Celso Furtado e Cristovam Buarque, Paris, 8 de março de 1991.** São Paulo: Paz e Terra, 2007.

BURTT, Edwin Arthur. **As bases Metafísicas da Ciência Moderna.** Editora Universidade de Brasília, 1983. (Coleção Pensamento Científico).

BUTTERFIELD, Herbert. **As origens da ciência moderna.** Lisboa; Rio de Janeiro: Edições 70, 1992 (Coleção Perfil. História das ideias e do pensamento).

CARR, Edward Hallet. **Que é história?** 9ª. ed. Rio de Janeiro, Paz e Terra, 2006.

CHALMERS, Alan Francis. **O que é ciência, afinal?** São Paulo: Brasiliense, 1993. (Leituras Afins).

CHAUI, M. **Convite à Filosofia.** São Paulo: Ática, 1988.

CHEVALLARD, Yves. **La transposición didáctica.** 3ª ed. Buenos Aires: Aique Grupo Editor, 2005. 200 p. (Psicología cognitiva y educación).

COHEN, I. B. **La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas.** Madrid. Alianza Editorial, 1983.

COHEN, I. B. **O nascimento de uma nova física.** Lisboa: Gradiva, 1988.

COMTE, Auguste. **Curso de filosofia positiva:** São Paulo: Abril Cultural, 1978 (Os Pensadores).

COPÉRNICO, Nicolau. **As revoluções dos orbes celestes.** 2ª Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1996.

COPÉRNICO, Nicolau. **Commentariolus: Pequeno comentário de Nicolau Copérnico sobre suas próprias hipóteses acerca dos movimentos celestes**. 2ª São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.

CRUZ, Frederico Firmo de Souza. **Faraday & Maxwell – Luz sobre os campos**. São Paulo: Odysseus Editora, 2005.

CRUZ, Sonia Maria S.C de Souza; ZYLBERSZTAJN, Arden. O enfoque ciência tecnologia e sociedade e a aprendizagem centrada em eventos. In: PIETROCOLA, Maurício (org.). **Ensino de física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001, p.171-196.

DEBUS, Allen. G. **El hombre y la naturaleza en el Renacimiento**. 2ª. ed. México: Fondo de Cultura Económica, 1996.

DEBUS, Allen George. Ciência e História o nascimento de uma nova área. In. GOLFARB, Ana Maria Alfonso; BELTRAN, Maria Helena Roxo. **Escrevendo a história da ciência, propostas e discussões historiográficas**. São Paulo: EDUC/Livraria Editora da Física/FAPESP, 2004, p.13-39.

DELIZOICOV, Demétrio. **Conhecimento, Tensões e Transições**. Tese de doutorado. FE/USP, São Paulo, 1991.

DELIZOICOV, Demétrio. Editorial. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v.13, n.3, p.197-218, dez. 1996.

DELIZOICOV, Demétrio. Problemas e Problematizações. In: PIETROCOLA, Maurício (org.). **Ensino de física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001, p.125-150.

DELIZOICOV, Demétrio; ANGOTTI, José André; PERNAMBUCO, Marta Maria. **Ensino de Ciências: fundamentos e métodos**. São Paulo: Cortez, 2002.

DELIZOICOV, D. La Educación en Ciencias y la Perspectiva de Paulo Freire. **Alexandria - Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v.1, n.2, p.37-62, 2008. Disponível em: <http://www.ppgect.ufsc.br/alexandriarevista/index.htm>.

DESCARTES, René. **Discurso do Método**. 3. ed. São Paulo: Abril Cultural, 1983. (Os pensadores).

DESCARTES, René. **Princípios da Filosofia**. 2. ed. São Paulo: Rideel, 2007. (Biblioteca Clássica).

DIAS, Penha Maria Cardoso. A (im)Pertinência da História da Física (um Estudo de Caso). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.23, n. 2, p.226-235, 2001.

DIAS, Penha Maria Cardoso; SANTOS, Wilma Machado Soares; SOUZA, Mariana Thomé Marques de. A Gravitação Universal (Um texto para o Ensino Médio). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.26, n.3, p.257-271, setembro, 2004.

DIAS, Valéria Silva Dias. **Michael Faraday: subsídios para metodologia de trabalho experimental**. São Paulo: USP, Pós Graduação em Educação (Dissertação de Mestrado) 2004.

DUARTE, Maria da Conceição. A História da Ciência na Prática de Professores Portugueses: implicações para a formação de professores de ciências. **Ciência & Educação**, v.10. n.3, p.317-331. 2004.

EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold. **A Evolução da Física**. São Paulo: Cia. Editora Nacional. 1971.

EINSTEIN, Albert. Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. In: LORENTZ, H. A.; EINSTEIN, A.; MINKOWSKI, H. **Textos fundamentais da física moderna. v.1. O princípio da relatividade**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1971.

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

EINSTEIN, Albert. Sobre o princípio da relatividade e suas aplicações. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.27, n.1, p.37-61, 2005.

EINSTEIN, A. **A Teoria da Relatividade Especial e Geral**. Rio de Janeiro. Editora Contraponto. 1999.

EISENSTAED, Jean; VIDEIRA, Antonio Augusto Passos. A relatividade geral verificada: o eclipse de sobral de 20/05/1919. In: MOREIRA, Ildeu de Castro; VIDEIRA, Antonio Augusto Passos (org). **Einstein e o Brasil**. Rio de Janeiro. Editora UFRJ, 1995.

EL-HANI, Charbel Niño; TAVARES, José Eraldo Madureira; ROCHA, Pedro Luís Bernardo da. Concepções epistemológicas de estudantes de biologia e sua transformação por uma proposta explícita de ensino Sobre história e filosofia das ciências. **Investigações em Ensino de Ciências** v.9, n. 3, p. 265-313, 2004.

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

EL-HANI, Charbel Niño. Notas sobre o ensino de História e Filosofia da Biologia na Educação Superior. In: NARDI, Roberto (Org). **A pesquisa em Ensino de Ciências no Brasil: alguns recortes**. São Paulo: Escrituras Editora, 2007, p.293-292-315.

FALCIANO, F.T. Geometria, espaço-tempo e gravitação: conexão entre conceitos da relatividade geral. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.31, n.4, p.4308-1 – 4308-10 2009.

FEYERABEND, Paul K. Consolando o Especialista. In. LAKATOS, Imre; MUSGRAVE, Alan (Org.). **A crítica e o desenvolvimento do conhecimento**. São Paulo: Cultrix: Edusp, 1979, p. 244-284.

FEYERABEND, Paul K. **Contra o método**. 3ª São Paulo: Unesp, 2007.

FOUREZ, Gerard. **A Construção das Ciências**. São Paulo. Editora UNESP. 1995.

FREIRE JR, Olival; MATOS FILHO, Manoel; VALLE, Adriano Lucciola do. Uma exposição didática de como Newton apresentou a força gravitacional. **Física na Escola**, v.5, n. 1, 2004.

FREIRE, Paulo. **Extensão ou comunicação?** 10ª ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1992.

FURTADO Celso. **Criatividade e dependência na civilização industrial**. São Paulo: Companhia das Letras, 2008.

GAGLIARDI, R. Cómo utilizar la história de las ciências en la enseñanza de las ciencias. **Enseñanza de las Ciencias**, v.6, n.3, p.291-296, 1988.

GALILEI, Galileu. **A mensagem das estrelas**. Rio de Janeiro: Museu de Astronomia e Ciências Afins: Salamandra, 1987.

GALILEI, Galileu. **O Ensaíador**. São Paulo. Nova Cultural. 1999.

GASTAL, M. L; REZENDE, L. Importância do curso de graduação na concepção de ciência dos estudantes de Ciências Biológicas. **Caderno de Programas e Resumos do IX Encontro Perspectivas do Ensino de Biologia**. Campinas: Graf. FE/UNICAMP, 2004. p. 51-52.

GEHLEN, S.T. **Temas e situações significativas no ensino de Ciências: contribuições de Freire e Vygotsky**. Dissertação de Mestrado. Unijuí: IJUÍ, 2006.

GEHLEN, S.T. **A função do problema no Processo ensino-aprendizagem de Ciências: contribuições de Freire e Vygotsky**. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA Florianópolis – SC 2009 (Tese de Doutorado em Educação Científica e Tecnológica).

GIANNOTTI, Jose Arthur. Comte: vida e obra. In: COMTE, Auguste. **Curso de filosofia positiva: Discurso sobre o espírito positivo; Discurso preliminar sobre o conjunto do positivismo; Catecismo positivista**. São Paulo: Abril Cultural, 1978. p. VI-XVIII. (Os Pensadores).

GIL-Perez Daniel; FERNÁNDES-MONTORO, Isabel; CARRASCOSA-ALÍS, Jaime; CACHAPUZ, Antonio; PRAIA João. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação** v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

GRECA, Ileana Maria; FREIRE JÚNIOR, Olival. A “crítica forte” da ciência e implicações para a educação em ciências. **Ciência & Educação** v. 10, n. 3, p. 343-361, 2004.

GREENE, Brian. **O Universo elegante: supercordas dimensões ocultas e a busca da teoria definitiva**. São Paulo: Companhia das Letras, 2001; tradução José Viegas Filho; revisão técnica Rogério Rosenfeld.

GRESSLER, Lori Alice. **Introdução à pesquisa: projetos e relatórios**. 2 ed. rev. atual. São Paulo: Loyola, 2004. 295p.

GUERRA, Andreia; REIS, José Claudio; BRAGA Marco. Uma abordagem histórico-filosófica para o eletromagnetismo no ensino médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v.21, n.2, p.224-248, agosto, 2004.

HALLIDAY, David; RESNICK Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física, v.2 – Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1996.

HARRES, João Batista Siqueira. Uma revisão de pesquisas nas concepções de professores sobre a natureza da ciência e suas implicações para o ensino. **Investigações em Ensino de Ciências**, v.4, n.3, p.197-211, 1999.

INFELD, Leopold. **Albert Einstein: a sua obra e a sua influência no mundo contemporâneo**. 3ª ed. Lisboa: Publicações Europa-América, 1950.

JAPIASSU, Hilton; MARCONDES, Danilo. **Dicionário básico de filosofia**. 3ª. ed. rev. e ampliada. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1996.

KNELLER, George F. **A ciência como atividade humana**. Rio de Janeiro: Zahar; São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1980.

KOESTLER, Arthur. **O homem e o Universo: como a concepção do Universo se modificou através dos tempos**. 2ª São Paulo: Ibrasa, 1989.

KOYRÉ, Alexandre. **Do mundo fechado ao universo infinito**. Rio de Janeiro; São Paulo: Forense Universitária; Ed. da Usp, 1979. 290 p. (Campo teórico).

KOYRÉ, Alexandre. Galileu e a Revolução Científica do século XVII. In: **Estudos de história do pensamento científico**. 2ª Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1991, p.181-196 (Campo teórico).

KOYRÉ, Alexandre. **Estudos galilaicos**. Lisboa: Dom Quixote, 1992. (Nova Enciclopédia; 28).

KUHN, Thomas S. A função do dogma na investigação científica. In: De Deus, J.D. (org). **A crítica da ciência**. Rio de Janeiro: Zahar, 1979a. p. 53-80.

KUHN, Thomas S. Lógica da Descoberta ou Psicologia da Pesquisa. In. LAKATOS, Imre; MUSGRAVE, Alan (Org.). **A crítica e o desenvolvimento do conhecimento**. São Paulo: Cultrix: Edusp, 1979b, p. 5-32.

KUHN, Thomas S. **A revolução copernicana: a astronomia planetária no desenvolvimento do pensamento ocidental**. Lisboa: Ed. 70, 1990.

KUHN, Thomas S. **A estrutura das revoluções científicas**. 4ª São Paulo: Perspectiva, 1996. 257 p. (Debates).

KUHN, Thomas S. **O caminho desde A Estrutura: ensaios filosóficos, 1970-1993**. São Paulo: Editora UNESP, 2006.

LABURÚ, Carlos Eduardo; ARRUDA, Sérgio de Mello, NARDI, Roberto. Pluralismo metodológico no ensino de ciências. **Ciência & Educação**, Bauru, v.9. n.2, p.247-260, 2003.

LAKATOS, Imre; MUSGRAVE, Alan (Org.). **A crítica e o desenvolvimento do conhecimento**. São Paulo: Cultrix: Edusp, 1979.

LOPES, José Leite. **Ciência e Liberdade: escritos sobre ciência e educação no Brasil**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ; CPBF/MCT, 1998.

LORENTZ, H. A. Fenômenos eletromagnéticos em um sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz. In: LORENTZ, H. A.;

EINSTEIN, A.; MINKOWSKI, H. **Textos fundamentais da física moderna. v.1. O princípio da relatividade.** Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1971.

MARTINS, André Ferrer P. História e Filosofia da Ciência no Ensino: há muitas pedras no caminho. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v.24, n.1, p.112-131, p. 112-131. 2007.

MARTINS, Roberto de Andrade. Sobre o papel da história da ciência no ensino. **Boletim da Sociedade Brasileira de História da Ciência**. v.9, p. 3-5, 1990. Também disponível em: <http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-42.pdf>.

MARTINS, Roberto de Andrade. Abordagens, métodos e historiografia da ciência. In: MARTINS, Ângela Maria (ed). **O tempo e o cotidiano na história**. São Paulo: Fundação para o Desenvolvimento da Educação, 1993. (série Ideias, 18). p. 73-8. Também disponível em: <http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-47.pdf>.

MARTINS, Roberto de Andrade. **O universo: teorias sobre a sua origem e evolução**. São Paulo: Moderna, 1994.

MARTINS, Roberto de Andrade. Descartes e a impossibilidade de ação à distância. In. FUKS, Saul (ed.). **Descartes 400 anos de um legado científico e filosófico**. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 1998. p.79-126.

MARTINS, Roberto de Andrade. Que tipo de história da ciência esperamos ter nas próximas décadas? **Episteme. Filosofia e História das Ciências em Revista** (10): 39-56. 2000. Também disponível em: <http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-76.pdf>.

MARTINS, Roberto de Andrade. História e história da ciência: encontros e desencontros. **Actas do 1º Congresso Luso-Brasileiro de História da Ciência e da Técnica** (Universidade de Évora e Universidade de Aveiro). Évora: Centro de Estudos de História e Filosofia da Ciência da Universidade de Évora, 2001, p.11-46. Também disponível em: <http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-86.pdf>.

MARTINS, Roberto de Andrade. Introdução geral ao Commentariolus de Nicolau Copérnico. In: Copérnico, Nicolau. **Commentariolus: Pequeno comentário de Nicolau Copérnico sobre suas próprias**

hipóteses acerca dos movimentos celestes. 2ª São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.

MARTINS, Roberto de Andrade. A dinâmica relativista antes de Einstein. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.27, n.1, p.11-26, 2005.

MARTINS, Roberto de Andrade. Introdução: a história das Ciências e seus usos na Educação. In: SILVA, Cibelle Celestino. (Org). **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino.** São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006, p. XVII-XXX.

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

MATTHEWS, Michael, 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, dez. 1995.

MATTHEWS Michael, R. In defense of modest goals when teaching about the nature of science. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 35, n. 2, p. 161-174, 1988.

MATTOS, Cristiano; HAMBURGUER, Amélia Império. História da ciência, interdisciplinaridade e ensino de física: o problema do demônio de Maxwell. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 10, n. 3, p. 477-490, 2004.

MEDEIROS, Alexandre. Entrevista com Tycho Brahe. **Física na Escola**, v.2. n.2, p.20-30, 2001.

MEDEIROS, Alexandre. Entrevista com Kepler: Do seu Nascimento à Descoberta das duas Primeiras Leis. **Física na Escola**, v.3. n.2, p.20-33, 2002.

MEDEIROS, Alexandre. Entrevista com Kepler: A Descoberta da Terceira Lei do Movimento Planetário. **Física na Escola**, v.4. n.1, p.19-24, 2003.

MEDEIROS, Alexandre. A História da Ciência e o ensino de Física Moderna. In: NARDI, Roberto (Org). **A pesquisa em Ensino de Ciências no Brasil: alguns recortes**. São Paulo: Escrituras Editora, 2007. p.273-292.

MEDEIROS, Alexandre; BEZERRA FILHO, Severino. A Natureza da Ciência e a Instrumentação para o Ensino da Física. **Ciência & Educação**, Bauru, v.6. n.2, p.107-117. 2000.

MEDEIROS, Alexandre; MONTEIRO, Maria Amélia. A invisibilidade dos pressupostos e das limitações da teoria copernicana nos livros didáticos de física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v.19, n.1, p.29-52, abr. 2002.

MENEZES, Luis Carlos de. Uma Física para o Novo Ensino Médio. **Física na Escola**, São Paulo, v.1, n.1, p.6-8. 2000.

MINKOWSKI, H. Espaço e Tempo. In: LORENTZ, H. A.; EINSTEIN, A.; MINKOWSKI, H. **Textos fundamentais da física moderna. v.1. O princípio da relatividade**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1971.

MOREIRA, Marco Antonio. Ensino de Física no Brasil: Retrospectiva e Perspectivas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.22, n.1, Março, 2000.

MOREIRA, Marco Antonio. A física dos quarks e a epistemologia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.29, n. 2, p.161-17, 2007.

MOREIRA, M. A; MASSONI, N. T; OSTERMANN, F. “História e epistemologia da física” na licenciatura em física: uma disciplina que busca mudar concepções dos alunos sobre a natureza da ciência. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.29, n. 1, p.127-134. 2007.

MORTIMER, E. F. **Linguagem e formação de conceitos no ensino de ciências**. Belo Horizonte, MG: Ed. UFMG, 2000, 383p.

MOURAO, Ronaldo Rogério de Freitas. **Kepler – A descoberta das Leis do Movimento Planetário**. São Paulo: Odysseus Editora, 2003.

NASCIMENTO, Maria da Graça S. Apresentação. In: **VOLTAIRE. Elementos da filosofia de Newton**. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 1996. Tradução Maria das Graças S. do Nascimento.

NARDI, Roberto. História da Ciência x Aprendizagem: Algumas semelhanças detectadas a partir de um estudo psicogenético sobre as ideias que evoluem para a noção de Campo de Força. **Enseñanza de Las Ciencias**, v.12, n.1, p.101-106, 1994.

NEWTON, Isaac. **Principia: princípios matemáticos da filosofia natural – Livro I**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

NEWTON, Isaac. **Principia: princípios matemáticos da filosofia natural - Livros II, III e O sistema do mundo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.

NUSSENZVEIG, Herch Moyses. **Curso de física básica**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2001. v.1.

OKI, Maria da Conceição Marinho; MORADILO, Edilson Fortuna de. O ensino de história da química: contribuindo para a compreensão da natureza da ciência. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 14, n. 1, p. 67-88, 2008.

OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA; Maria de Fátima Oliveira. **Astronomia e astrofísica**. 2.ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.

OMNÈS, Roland. **Filosofia da Ciência contemporânea**. São Paulo. Editora UNESP, 1996.

OSTERMANN, Fernanda. A Epistemologia de Kuhn. **Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis**, v.13, n.3, p.184-196, dez. 1996.

PAGLIARINI, Cassiano Rezende. **Uma análise da história e filosofia da ciência presente em livros didáticos de física para o ensino médio**. São Carlos: USP, Pós Graduação em Física (Dissertação de Mestrado). 115 p. 2007.

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

PAIXÃO, M. F.; CACHAPUZ, A. Formación epistemológica y cambio de imágenes de ciencia impartidas en el aula. **Revista de Educación en Ciencias / Journal of Science Education**, v.2, n. 1, p. 33-38, 2001.

PEDUZZI, Luiz, O. Q. **As concepções espontâneas, a resolução de problemas e a História e Filosofia da Ciência em um curso de Mecânica**. Florianópolis: UFSC. Pós Graduação em Educação (Tese de Doutorado em Educação), 1998.

PEDUZZI, Luiz, O. Q. Sobre a utilização didática da História da Ciência. In: PIETROCOLA, Maurício (org). **Ensino de física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001. p.151-170.

PEDUZZI, Luiz, O. Q. Sobre Continuidades e Descontinuidades no Conhecimento Científico: uma discussão centrada na perspectiva centrada na perspectiva kuhniana. In: SILVA, Cibelle Celestino. (Org). **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006, p. 59-83.

PEDUZZI, Luiz, O. Q. Do átomo grego ao átomo de Bohr: receptividade inicial e perspectivas de pesquisa em um texto voltado para uma disciplina de Evolução dos Conceitos da Física. In: NARDI, Roberto (Org). **A pesquisa em Ensino de Ciências no Brasil: alguns recortes**. São Paulo: Escrituras Editora, 2007, p.273-292.

PEDUZZI, Luiz. O. Q. **Força e movimento: de Thales a Galileu**. Departamento de Física (Publicação interna), UFSC. 2008a.

PEDUZZI, Luiz. O. Q. **Da física e da cosmologia de Descartes à gravitação newtoniana**. Departamento de Física (Publicação interna), UFSC. 2008b.

PEDUZZI, Luiz O. Q. **A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica**, p.174-196. Departamento de Física, UFSC, publicação interna, 2008c.

PEDUZZI, Luiz, O. Q; PEDUZZI, Sônia Silveira. Sobre o papel da resolução literal de problemas no Ensino da Física: exemplos em Mecânica. In: PIETROCOLA, Maurício (org). **Ensino de física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001. p.101-123.

PEDUZZI, Sônia Silveira. Concepções alternativas em Mecânica. In: PIETROCOLA, Maurício (org). **Ensino de física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001. p.53-75.

PENA, Fábio L. A. O uso didático da história da ciência após a implantação dos parâmetros curriculares nacionais para o ensino médio (PCNEM): um estudo a partir de relatos de experiências pedagógicas publicados em periódicos nacionais especializados em ensino de física (2000-2006). **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v.26, n.1, p.48-65, abr. 2009.

PERRELLI, Maria Aparecida de Souza. A **transposição didática no campo da indústria cultural: um estudo dos condicionantes dos conteúdos dos livros didáticos de ciências**. Florianópolis: UFSC, Pós Graduação em Educação. (Dissertação de Mestrado). 198p. 1996.

PESSANHA, José Américo, Mota. Descartes vida e obra. In. DESCARTES, René. **Discurso do Método**. 3.ed. São Paulo: Abril Cultural, 1983 (Os pensadores).

PIETROCOLA, Maurício. Construção e realidade: o papel do conhecimento físico no entendimento do mundo. In: PIETROCOLA, Maurício (org). **Ensino de física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001. p. 9-32.

PIAGET, Jean.; GARCIA, Rolando. Psicogênese e história das ciências. Lisboa: Dom Quixote, 1987. Tradução de Maria Fernanda de Moura Rebelo Jesuino, 251p (Coleção Ciência nova, n.6).

PIETROCOLLA, Maurício; PINHO ALVES, José; PINHEIRO, Terezinha de Fátima. Prática interdisciplinar na formação disciplinar de professores de ciências. **Investigações em Ensino de Ciências**, v.8, n.2, p.131-152. 2003.

PINHO ALVES, José. **Atividades experimentais: do método à prática construtivista**. Florianópolis: UFSC, Pós Graduação em Educação. (Tese de Doutorado). 302p. 2000.

PINHO ALVES, José. A Eletrostática como exemplo de Transposição Didática. In: PIETROCOLA, Maurício (org). **Ensino de física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001. p. 77-100.

POPPER, Karl, R. **A Lógica da Pesquisa Científica**. São Paulo: Cultrix: Edusp, 1975.

POPPER, Karl, R. **A Ciência Normal e seus Perigos**. In. LAKATOS, Imre; MUSGRAVE, Alan (Org.). A crítica e o desenvolvimento do conhecimento. São Paulo: Cultrix: Edusp, 1979, p. 63-71.

POPPER, K. R. **Conjecturas e refutações**. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 1982.

POPPER, K. R. **A teoria dos quanta e cisma na Física**. Lisboa: D. Quixote, 1989.

POSNER, G. J. et. al. Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. **Science Education**, v. 66, p. 211-27, 1982.

PRAXEDES, Gilmar; PEDUZZI, Luiz. O. Q. Tycho Brahe e Kepler na Escola: uma contribuição à inserção de dois artigos em sala de aula. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 31, n. 3, set. 2009.

REICHENBACH, H. **Experience and prediction**. Chicago: UCP, Phoenix, 1961.

RENN Jürgen. A física clássica de cabeça para baixo: Como Einstein descobriu a teoria da relatividade especial. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.27, n.1, p.27-36, 2005.

RIBEIRO, Darcy. **O povo brasileiro: a formação e o sentido do Brasil**. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

RICARDO, Carlos Elio. **Competências, Interdisciplinaridade e Contextualização: dos Parâmetros Curriculares Nacionais a uma compreensão para o ensino das ciências.** Florianópolis. UFSC, Pós Graduação em Educação Científica e Tecnológica. (Tese de Doutorado). 257 p., 2005.

RIVAL, Michel. **Os grandes experimentos científicos.** Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

ROCHA, José Fernando. Origem e evolução do eletromagnetismo. In. ROCHA, José Fernando (org). **Origens e Evolução das Ideias da Física** Salvador: EDUFBA, 2002.

RODRIGUES, Carlos Daniel. **Inserção da Teoria da Relatividade no Ensino Médio: uma nova proposta.** Florianópolis: UFSC, Pós Graduação em Educação (Dissertação de Mestrado). 170 p. 2008.

RONAN, Colin A. **Historia ilustrada da ciência da Universidade de Cambridge, v. 3: da Renascença à Revolução Científica.** Rio de Janeiro: Jorge Zahar, Ed. 1987.

ROSA Katemari; MARTINS, Maria Cristina. A Inserção da História e Filosofia da Ciência no Currículo de Licenciatura em Física da Universidade Federal da Bahia: uma visão de professores universitários. **Investigações em Ensino de Ciências**, v.12, n.3. 2007. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/revista.htm>.

RUIZ Antonio Ibañes; RAMOS Mozart Neves; HINGEL Murilo. **Escassez de Professores no Ensino Médio: Propostas estruturais e emergenciais.** Brasília. Ministério da Educação, 2007.

SANTOS, César Sátiro dos; CALUZI, João José. História da ciência e ensino de ciências: a visão externalista. In: CALDEIRA, Ana Maria de Andrade; CALUZI, João José (Org.). **Filosofia e História da Ciência: contribuições para o ensino de ciências.** Ribeirão Preto Kayrós, 2005. Bauru: Cá entre nós, 2005 (Educação para a Ciência; 6).

SCHEID, Neusa Maria John. **A contribuição da história da biologia na formação inicial de professores de ciências biológicas.** Florianópolis: UFSC. Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica (Tese de Doutorado) 2006.

SCHEMBERG, Mário. **Pensando a Física**. São Paulo: Nova Stella Editorial, 4ª edição, 1990.

SCHWARTZMAN, Simon. **A formação da comunidade científica no Brasil**. São Paulo: Ed. Nacional; Rio de Janeiro: FINEP, 1979.

SHANKLAND, R. S. Michelson-Morley experiment. **American Journal of Physics**, v. 32, n. 1, p. 16-35, 1964 .

SILVA, Cibelle Celestino. Prefácio. In: SILVA, Cibelle Celestino. (Org). **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

SILVA, Cibelle Celestino; PIMENTEL Ana Carolina. Uma história da eletricidade presente em livros didáticos: o caso de Benjamin Franklin. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v.25, n.1, p.141-159, abr. 2008.

SILVEIRA, Fernando Lang. A Filosofia da Ciência de Karl Popper: O Racionalismo Crítico. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v.13, n.3, p.197-218, dez. 1996 a.

SILVEIRA, Fernando Lang. A Metodologia dos Programas de Pesquisa: A Epistemologia de Imre Lakatos. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v.13, n.3, p.219-230, dez. 1996b.

SILVEIRA, Fernando Lang da. A premissa metafísica da revolução copernicana. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v.19, n.3, p.407-410, dez. 2002.

SILVEIRA, Fernando Lang da; PEDUZZI, Luiz. O. Q. Três Episódios de Descoberta Científica: da caricatura empirista a uma outra história. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v.23, n.1, p.26-52, abr. 2006.

SIQUEIRA, Maxwell Roger Da Purificação. **Do Visível ao Indivisível: uma proposta de Física de Partículas Elementares para o Ensino Médio**. São Paulo: USP, Faculdade de Educação (Dissertação de Mestrado). 166p. 2006.

SLONGO, Maria Inês Pinsson. **História da Ciência e Ensino: contribuições para a formação do professor de Biologia.** Florianópolis: UFSC, Pós Graduação em Educação. (Dissertação de Mestrado). 1996.

SNOW, Charles Percy. **As duas culturas e uma segunda leitura.** São Paulo: EDUSP, 1995.

SNYDERS, G.A. **Alegria na Escola.** São Paulo: Manole, 1988.

STACHEL John. 1905 e tudo o mais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.27, n.1, p.5-9, 2004.

STAUB, Ana Carolina. **Contribuições da Epistemologia Histórica de Bachelard no Estudo da Evolução dos Conceitos da Óptica.** Florianópolis: UFSC, Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica (Dissertação de Mestrado). 197 p., 2005.

STUDART, Nelson. Editorial. Uso da pesquisa em Ensino de Física na prática docente. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n.3, p. 259. 2001.

STUDART, Nelson. Editorial. Ensino de Física: Reflexões. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n.3, p. 311-312. 2005.

TEIXEIRA, Elder Sales; FREIRE JR, Olival; EL-HANNI, Charbel Niño. A influência de uma abordagem contextual sobre as concepções acerca da natureza da ciência de estudantes de física. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 15, n. 3, p. 529-526, 2009.

TEODORO, Sandra Regina. **A história da ciência e as concepções alternativas de estudantes como subsídios para o planejamento de um curso sobre atração gravitacional.** Bauru: UNESP, Pós-Graduação em Educação em Ciências (Dissertação de Mestrado) 278p. 2000.

TEODORO, Sandra Regina, NARDI, Roberto. SILVA, Dirceu da. A história da ciência na formação do professor: subsídio para um curso sobre o tema atração gravitacional visando às mudanças de postura na ação docente. **Ciência&Educação**, Bauru, v.10, n.3, p.491-500, 2004.

THILLIER, Pierre. **Ciência e Subjetividade: o Caso Einstein**, In. De Arquimedes a Einstein: a face oculta da invenção científica. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1994. p. 225-247.

UEMS/FÍSICA. **Projeto Pedagógico do Curso de Física – Licenciatura**. Dourados - MS. Curso de Física, 2000. Disponível em <http://fisica.uems.br/>

UEMS/FÍSICA. **Projeto Pedagógico do Curso de Física – Licenciatura**. Dourados - MS. Curso de Física, 2005. Disponível em <http://fisica.uems.br/>.

UEMS/FÍSICA. **Projeto Pedagógico do Curso de Física – Licenciatura**. Dourados - MS. Curso de Física, 2009. Disponível em <http://fisica.uems.br/>.

VIDEIRA, Antonio Luciano Leite Videira. A(s) relatividade(s) de Einstein. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, n.30, p.63-82, 2005.

VILLANI, Alberto. O confronto Einstein-Lorentz e suas interpretações. Parte I: A revolução Einsteiniana. **Revista de Ensino de Física**, v.3, n.1, p.31-45. 1981.

VILLANI, Alberto. Filosofia da ciência e ensino de ciência: uma analogia. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 7, n. 2, p. 169-181, 2001.

VOLTAIRE. **Elementos da filosofia de Newton**. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 1996. Tradução Maria das Graças S. do Nascimento.

WESTFALL, Richard S. **A vida de Isaac Newton**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995. 428 p.

WHITAKER, M.A.B. “History and quasi-history in physics education”. **Physics Education**, 14, 108-112 (Part I), 239-242 (Part II). 1979.

ZANETIC, João. **Física também é Cultura**. São Paulo: USP, Pós Graduação em Educação 212p. (Tese de Doutorado). 252 p., 1989.

ZANETIC, João. Literatura e cultura científica. In: ALMEIDA, Maria José P. M de; Silva Henrique César da (orgs.). **Linguagens, leitura e ensino da ciência**. Campinas, SP: Mercado de Letras: Associação de Leituras do Brasil – ALB, 1998. p.11-36.

ZYLBERSZTAJN, Arden. Galileu um cientista e várias versões. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. Florianópolis, 5 (Número Especial): 36-48, jun. 1988.

ZYLBERSZTAJN, A. Revoluções Científicas e Ciência Normal na Sala de Aula. In: **Tópicos em Ensino de Ciências**. Marco Antônio Moreira e Rolando Axt (Org). Sagra. Porto Alegre, 1991, p.47-61.

ZYLBERSZTAJN, A. Resolução de Problemas: uma perspectiva kuhniana. In: **VI Encontro Nacional dos Pesquisadores em Ensino de Física, VI**. Anais, Florianópolis, out. 1998.