

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA, INSTITUTO DE QUÍMICA E
FACULDADE DE EDUCAÇÃO

A Realidade escondida: a dualidade onda-partícula para estudantes do Ensino Médio

Guilherme Brockington

Orientador: Prof. Dr. Maurício Pietrocola

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Física, ao Instituto de Química e à Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de mestre em Ensino de Ciências.

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Fernanda Ostermann (IF – UFRGS)

Prof. Dr. Osvaldo Pessoa Jr. (FFLCH – USP)

Prof. Dr. Maurício Pietrocola (FE – USP)

São Paulo

2005

“A minha alma tá armada e apontada para a cara do sossego”

O Rappa

Esta dissertação é bem mais que um trabalho acadêmico. É a materialização de um sonho, fruto de minha crença na educação e de uma paixão pelo ato de educar. Nela, encontra-se a certeza de todas as dúvidas que tive quando decidi abandonar o caminho da pesquisa em física “dura” e abraçar aquilo que amo e sei fazer. Mais que qualquer outra coisa, esse trabalho é um pedaço de mim.

Até aqui, muitas pessoas foram especiais e me ajudaram a perseguir o que acredito. Minha gratidão é imensa e, certamente, ainda que pudesse, não saberia me expressar. Infelizmente, trato melhor os números que as palavras....

Agradeço à minha família, meu maior e mais valioso bem.

À minha amada Maria Emília de Oliveira Brockington, minha rocha, meu porto seguro, minha fonte inesgotável de força e otimismo. Exemplo de dignidade, simplicidade, honestidade e nobreza. Quem me fez amar a leitura e acreditar que nada é impossível. Mãe, nunca, nunca seria o que sou sem você.

Ao meu amado Norman Richard Brockington, meu apoio, minha força nos momentos de fraqueza, minha fonte de tranquilidade e serenidade. Quem sempre foi meu maior exemplo de homem, de sabedoria, de caráter e dignidade. Quem me fez, e faz, ter paixão por conhecer. Pai, nunca, nunca seria o que sou sem você.

À minha querida Angélica Metico Araki, irmã que Deus escolheu pra mim, jóia rara, inestimável, exemplo de doçura, carinho, determinação e força. Quem me faz ser mais tranquilo, mais feliz e seguro. Quem sempre me ajudou em tudo e a única pessoa que nunca me disse um não. Gé, nunca, nunca seria o que sou sem você.

Tenho orgulho de ser filho de duas pessoas fantásticas e irmão da pessoa mais especial que há no mundo. Sou abençoado por isso. Vocês são os donos de todo meu amor, respeito, admiração, gratidão e carinho. Amo vocês!

Agradeço à minha tríade mineira, minha base de sustentação, meu apoio. Meus três grandes, verdadeiros e sinceros amigos. Ainda que distantes, me inspiraram e encorajaram: Danielle Jenevain Grazinoli, minha mais linda e doce amiga. Companheira inseparável, leal, verdadeira, que nunca me deixou e cuida de mim como ninguém mais é capaz de fazer. Lembrar você me traz a paz necessária nos momentos difíceis. Gláucio Anacleto de Almeida, meu irmão Cuité, exemplo de força, determinação e coragem. Assistiu à minha primeira aula, compartilhando meu sonho. Nossas conversas forjam o meu espírito e reforçam a certeza do caminho que escolhi. Ângela Guida, quem acompanha meu sonho desde o início, nunca esteve distante. Mulher especial, dona de uma inteligência ímpar, sincera como só ela sabe ser. Não faz nada para agradar ninguém e tem orgulho de ser como é. Minha alma gêmea.

Em São Paulo, encontrei pessoas que tornam a minha vida mais bonita, mais tranquila. Agradeço a essas pessoas que caminharam ao meu lado, muitas vezes dividindo meu fardo, amenizando os problemas que encontrei aqui.

À Carolina França, por acompanhar meu trabalho e ter me ajudado sempre. Carol, minha menina, obrigado por ter entrado em minha vida. Impossível te esquecer.

À galera do Lapef, Alex, Cândida, Carla, Diógenes, Érika, Francisco, Jackson, João, Josias, Jorge, Júnior, Luciana, Maria Lúcia Abib, Maria Lucia Vinha, Rogério, Talita, Thais Cortellini, Valéria e Wellington, por fazerem meu dia-a-dia animado e divertido. Sou especialmente grato à Renata e ao André, por encararem a tarefa mais chata do universo: as transcrições dos dados! Muito, muito obrigado pelo trabalho imprescindível de vocês. Quero que Thaís Forato saiba o quanto sua presença foi de extrema importância na reta final de meu mestrado. Sua alegria contagiante renovou meu fôlego no momento que mais precisei. Thais, muito obrigado. Agradeço à Cristina pela atenção e ajuda inestimável. Cris, obrigado por ter acreditado em minha aposta e encarado o desafio de aplicar meu curso. Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro.

Quero agradecer a todos do Corredor do Ensino, em especial à Soraya Noriko Uema. Japinha, obrigado por nossas eternas e deliciosas discussões e por fazer meus dias mais alegres quando cheguei em sampa. Adoro você.

Aos eternos companheiros Estevam e Maxwell. Meus amigos, obrigado por compartilharem nossa luta constante. O que passamos aqui, certamente, foi a maior das conquistas. Obrigado por tornarem meus dias tranquilos, divertidos e prazerosos.

Agradeço à minha base paulista de apoio: Lúcia Helena Sasseron, moça sensível, delicada e brilhante, que tem o dom de me tranquilizar com um simples olhar. Obrigado pelas críticas e pela leitura zelosa do meu trabalho; e Ivã Gurgel, genial, ácido, único. Obrigado por suas críticas e por nossas discussões filosóficas, que enriqueceram meu trabalho e minha vida.

Agradeço à Anna Maria Pessoa de Carvalho, Luiz Carlos de Menezes, Manoel Roberto Robilotta e Yassuko Houssume. Obrigado por terem me acolhido com tanta atenção e cuidado. São meus modelos de competência, seriedade e humildade.

Agradeço, de modo muito especial ao Maurício Pietrocola, que durante todo esse tempo foi muito mais que um orientador. Obrigado por ter me transformado, sem ter me tolhido, sem ter me domado. Ensinou-me muito mais do que esperava, me orientando para a vida. Levarei para sempre o que aprendi com você. Mais que um mestrando, conquistou um amigo. Você tem todo meu respeito e admiração. Valeu!

E agradeço a Deus, o Cara, aquele que dá sentido a tudo em minha vida. Quem guia meus passos, me acompanha todo o tempo e nunca, nunca me abandona. Muito obrigado por você não ser um hipótese *ad hoc*.

Dedico esta dissertação à minha querida avó Catarina, que hoje, certamente, está que é só orgulho. Dó, impossível dizer quanta saudade carrego comigo.

Resumo

Esta dissertação é fruto da necessidade da inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Nosso trabalho consistiu da elaboração, implementação e análise de um curso voltado à apresentação de elementos da Física Quântica.

Um dos principais objetivos deste curso, implementado em uma escola da rede pública do estado de São Paulo, foi mostrar aos alunos como a física apreende a realidade através de seus modelos. Nossa intenção foi introduzir alguns conceitos da Física Quântica a partir de uma seqüência didática que permitisse apresentar aos estudantes a dualidade onda-partícula, revelando assim características estranhas acerca da natureza da luz. Por meio da apresentação de diferentes interpretações da Mecânica Quântica, revelamos e discutimos as implicações filosóficas e epistemológicas advindas da construção da teoria atômica, para que os alunos pudessem entender, mesmo que preliminarmente, alguns dos problemas filosóficos advindos da Teoria Quântica.

A análise foi realizada à luz da teoria da Transposição Didática, de Yves Chevallard, um instrumento eficiente para analisar o processo através do qual o saber produzido pelos cientistas se transforma naquele que está contido nos programas e livros didáticos e, principalmente, naquele que realmente aparece nas salas de aula.

A partir dos resultados obtidos pudemos concluir que abordagens filosóficas, de caráter epistemológico e ontológico, conduzidas com cuidado, constituem-se em estratégias alternativas de avaliação e geram a produção de atividades em que é possível trabalhar a imaginação e o poder de abstração necessários para a compreensão das teorias envolvidas nesta parte da Física. Enfoques desta natureza são raramente considerados quando das proposições de inserção de tais temas no Ensino Médio. Revelamos assim a necessidade de se criar momentos nos quais seja possível levar os alunos a travarem estas discussões.

Abstract

This dissertation has its roots in the need to insert topics of modern and contemporary Physics in the teaching at the secondary school level. Our work comprised the elaboration, implementation and analysis of a course designed to introduce elements of Quantum Physics.

One of the principal objectives of this course, implemented in a school of the public network of the State of São Paulo, was to show the pupils how Physics grapples conceives reality through its models. Our intention was to introduce some elements of Quantum Physics starting from a didactic sequence which would allow us to show to the pupils the duality wave—particle, thus revealing the strange characteristics relating to the nature of light. By means of different interpretations of Quantum Mechanics we showed and discussed the philosophical and epistemological implications of the Quantum Theory.

The analysis was carried out in the light of the theory of Didactic Transposition of Yves Chevallard, an efficient means of analyzing the process by which the knowledge produced by the scientists is transformed into that which is contained in the teaching programs and textbooks and, above all, that which really appears in the classroom.

From the results obtained we could conclude that the philosophical approaches, of an epistemological and ontological nature, carefully implemented, constitute alternative strategies and serve to generate activities in which it is possible to work on the imagination and the power of abstraction necessary for understanding the theories involved in this area of Physics. Approaches of this nature are rarely considered for the inclusion of such topics in the teaching at the secondary school level. We show in that way the need to create situations in which it is possible for the pupils to get to grips with these concepts.

Sumário

1. Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: a necessidade de novos rumos	9
1.1 – Introdução	9
1.2 – A necessidade do Ensino de Física Moderna	17
1.3 – Como compreender a Física Moderna	24
1.4 – Representações do mundo físico	32
2. A realidade na Mecânica Quântica e suas implicações para o Ensino de Física	35
2.1 – Um breve relato histórico: das origens da “Velha Física Quântica” (1900-1924) à “Verdadeira Mecânica Quântica” (1925-1927)	37
2.2 – Interpretações	53
2.3 – Quatro interpretações da Mecânica Quântica	55
2.4 – A realidade	59
2.5 – O Realismo e o Anti-Realismo	62
2.6 – Realismo científico	65
2.7 – Implicações para o Ensino de Ciências	70
2.8 – A necessidade da realidade no ensino da Mecânica Quântica	76
3. A Transposição Didática: uma ferramenta de análise	79
3.1 – A Transposição Didática	79
3.2 – É natural a forma de se ensinar física?	82
3.3 – Anatomia da Transposição Didática	91
3.3.1 – Noosfera, a eminência parda	94
3.3.2 – As esferas do Saber	97
3.4 – O processo da transposição	101
3.5 – A sobrevivência dos saberes	105
3.6 – As Regras da Transposição Didática	109
4. A metodologia da pesquisa	114
4.1 – Metodologia	114
4.2 – O papel da professora	118
4.3 – A coleta dos dados	120
5. A nova estrutura do Saber	124
5.1 – Reconstrução dos Saberes	124
5.2 – A escolha dos Saberes e o processo de confecção do curso de introdução aos conceitos de Física Moderna	127
5.3 – Algumas propostas de introdução de FMC no Ensino Básico	128
5.4 – Os conteúdos de FMC presentes nos livros didáticos	135
5.4.1 – O levantamento dos temas	136
5.4.2 – Um olhar sobre os livros didáticos	140
5.5 – O curso: desafios iniciais	153
5.6 – Curso: a estrutura final	158
6. Transposição Didática: um olhar sobre a Física Quântica	165
6.1 – A análise dos dados	165
6.2 – A análise dos marcadores	166
Considerações Finais	240
Bibliografia	253

1. Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: a necessidade de novos rumos

1.1 – Introdução

É inegável que os conteúdos contemporâneos da ciência exercem uma influência cada vez maior no cotidiano das pessoas exigindo que sua compreensão seja imprescindível para o entendimento do mundo moderno. Os cidadãos vivem inseridos em uma sociedade cada vez mais tecnológica, fruto de uma industrialização que tomou proporções inimagináveis a partir do século XX, alavancada por “revolucionárias” teorias científicas. A “Física Moderna” que surgia seria, então, fundamental para a leitura do mundo que o homem viria a construir.

No século passado, ocorreram várias rupturas teóricas, transformando conceitos e significados clássicos de maneira nunca antes imaginada. Talvez esse tenha sido um dos períodos de maior instabilidade para conceitos já cristalizados em toda a história da física. Desta forma, teorias como a Relatividade Geral e Mecânica Quântica produziram novos conhecimentos, traçaram inesperados rumos nas pesquisas científicas e deram suporte para a criação de tecnologias que figuravam, até então, somente em filmes de ficção.

Estas drásticas mudanças na física não ficaram atreladas apenas à comunidade científica, vindo a influenciar diretamente toda a sociedade. Os artefatos tecnológicos que surgiram mudaram comportamentos, ditaram regras e geraram expectativas e dúvidas. Um pequeno exemplo de sua influência no mundo social é o compartilhamento de arquivos pela Internet. A troca livre de arquivos de músicas digitalizadas, os temíveis mp3, causa prejuízos bilionários na indústria fonográfica mundial, obrigando-a a repensar toda sua estratégia de funcionamento. As pessoas que trocam gratuitamente seus arquivos pela rede sentem-se como “guerrilheiros”, rebeldes revolucionários lutando contra o domínio das imponentes gravadoras.

Há, então, uma grande exposição às inovações diárias, que vão desde o entretenimento aos mais modernos e avançados aparelhos utilizados pela medicina. Em meio a um crescente número de novidades, as pessoas sentem-se cada vez mais atraídas e seduzidas por todas estas “maravilhas” da ciência e da tecnologia.

No entanto, poucos são aqueles que conseguem ultrapassar a impressão imediata de surpresa. Em geral, não é possível ao cidadão comum (aquele não

especializado nas áreas científicas e tecnológicas) entender o que realmente ocorre no interior de produtos dessas novas tecnologias: embora vivendo no século XXI, muitos se portam diante dessa nova realidade cotidiana, como os nativos diante dos utensílios dos europeus conquistadores. Faltam-lhes conhecimentos, capazes de permitir leituras do mundo tecno-virtual no qual vivem.

Assim, buscando trazer os saberes escolares para mais perto da vida das pessoas, a ampliação da Educação Básica para 11 anos (promovida pela Lei de Diretrizes e Base) teve como idéia central garantir acesso aos conhecimentos para a formação de um cidadão crítico e consciente.

Nos *Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio* (PCNEM) foram explicitados os elementos e componentes essenciais de cada área do conhecimento, e servem como referência para o que foi dito até agora:

As novas tecnologias da comunicação e da informação permeiam o cotidiano, independente do espaço físico, e criam necessidades de vida e convivência que precisam ser analisadas no espaço escolar. A televisão, o rádio, a informática, entre outras, fizeram com que os homens se aproximassem por imagens e sons de mundos antes inimagináveis. (BRASIL, 1999, p.132).

Já no *PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais* (PCN+) pode se encontrar a seguinte ratificação do que foi acima exposto:

A presença do conhecimento de Física na escola média ganhou um novo sentido a partir das diretrizes apresentadas nos PCNEM. Trata-se de construir uma visão da Física voltada para a formação de um cidadão contemporâneo, atuante e solidário, com instrumentos para compreender, intervir e participar na realidade. (BRASIL, 2002, p.1).

Porém, como suprir estas necessidades atuais do cidadão com um currículo de Física embasado em conhecimentos dos séculos XVII, XVIII e XIX? Em outras palavras, como garantir uma verdadeira formação para a cidadania no mundo atual se os conhecimentos físicos mais modernos e contemporâneos encontram-se afastados da Educação Básica?

Junta-se a essas premissas a forma isolada e descontextualizada que tem caracterizado os currículos de Física nas escolas brasileiras.

Para Terrazzan:

Os currículos das escolas brasileiras têm permanecido tradicionais e inalterados em sua estrutura básica. Na grande maioria das vezes, não passam de meras listas de conteúdos e os planejamentos correspondentes se constituem em uma cópia de índice dos livros didáticos mais adotados. Estes currículos costumam vir prontos para o consumo dos professores, aos quais resta apenas a função de executá-los 'acriticamente' em sala de aula. (TERRAZZAN, 1997, p.608)

A definição de uma nova proposta curricular capaz de propiciar uma educação geral, fornecendo condições para que os alunos exerçam plenamente sua cidadania e, ao mesmo tempo, os capacite a aprofundar suficientemente tópicos da Física é um grande desafio a ser enfrentado pelos professores conjuntamente com a comunidade de pesquisadores em Ensino de Física. Para Menezes e Hosoume:

A escolha por esta nova visão do aprendizado escolar da física não é uma opção pela superficialidade, pela 'cultura de almanaque'. Pelo contrário, é uma tentativa de dar aos estudantes uma idéia da ciência e da tecnologia, como parte da cultura, como visão de mundo, e também da cultura da produção e dos serviços da atualidade. Não se trata só de ancorar o desenvolvimento abstrato em exemplos concretos, vividos, do cotidiano do aluno. Trata-se de desenvolver uma sistemática de reflexão e aprendizado, que transcenda as paredes da escola, que instrua o olhar e o pensar na rua, em casa e no trabalho. (MENEZES e HOSOUME, 1997, p.28).

A necessidade de uma atualização curricular que passe a englobar conhecimentos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) já é ressentida no meio acadêmico há quase duas décadas (Gil *et alii*. 1987, 1988; Barojas, 1988).

Hoje parece consolidada a certeza da necessidade de inserção desses temas nos programas escolares e, pelo que indicam as pesquisas em ensino de Física, parece também haver um consenso quanto à importância de uma mudança curricular (GIL e SOLBES, 1993; FISCHLER e LICHTFELDT, 1992; CUPPARI *et alii*, 1997).

As justificativas para essa atualização se fundamentam também na insatisfação manifesta de professores e alunos, que perdem o entusiasmo ao não poder participar do entendimento das pesquisas atuais em Física (BAROJAS, 1988; STANNARD, 1990). Para Swinbank (1992) é difícil encontrar um professor que ainda não tenha sido perguntado acerca dos quarks e da expansão do universo. "Neste

sentido é importante que o currículo busque incorporar os desenvolvimentos da Física que ocorreram neste século, trazendo a Física do segundo grau para mais próximo da Física que os físicos fazem atualmente”. (BORGES *et alii*, 1997, p.215).

Vale notar que fora das escolas os alunos recebem estímulos de diversos setores da sociedade, que acabam por mantê-los em contato com realizações no campo da ciência. Filmes, sites na Internet, histórias em quadrinhos, entre outros, aproximam os adolescentes do mundo da ciência e da tecnologia sem, no entanto, fornecer princípios e bases conceituais para entendê-lo. Nesse processo, é comum que se criem concepções espontâneas sobre fenômenos e o fazer científico que, muitas vezes, os estudantes levarão por toda a vida.

Podemos verificar que existem inúmeras razões que parecem indicar que uma atualização nos currículos de Física da Educação Básica não só é necessário como urgente. Segundo Ostermann e Moreira

[...] pode-se constatar que há muitas justificativas na literatura que nos permite lançar uma hipótese: há uma tendência nacional e internacional de atualização dos currículos de Física e muitas justificativas para tal. No entanto [...] ainda é reduzido o número de trabalhos publicados que encaram a problemática sob a ótica do ensino e, mais ainda, os que buscam colocar, em sala de aula, propostas de atualização. (OSTERMANN E MOREIRA, 2000, p.27).

Embora em pequeno número (quando comparados com os trabalhos efetuados em outras áreas da pesquisa em Ensino de Física), existem alguns trabalhos voltados à tentativa de buscar formas de introduzir a FMC na Educação Básica.

Visto que a maioria das experiências de FMC não pode ser feita nos laboratórios escolares, uma alternativa encontrada para contornar este problema surge por meio do uso de simulações computacionais. Além de contribuir para a atualização curricular, estas simulações também trazem à luz uma discussão acerca de quais recursos instrucionais podem ser utilizados, de maneira eficiente, para o ensino de Física.

Deste modo pensamos também abordar outras questões altamente relevantes tais como, a utilização dos novos recursos tecnológicos disponíveis; como softwares de simulação e a aquisição de dados para incorporar ao ensino de uma Nova Física. (CAVALCANTE, 1999, p.551)

Em uma atitude pioneira, professores do departamento de Física da UFRGS desenvolveram um projeto de construção de softwares educacionais em Física Moderna, focalizando o efeito fotoelétrico (VEIT *et alii*, 1987).

Ainda usando uma abordagem computacional destacamos o trabalho do GoPEF que faz uso de softwares desenvolvidos na PUC/SP e de Applets disponíveis em sites da Internet para a construção de material didático utilizado em suas oficinas de capacitação docente (CAVALCANTE, 1998).

Na perspectiva de aplicação em sala de aula, pode-se também encontrar uma série de trabalhos de produção de material de baixo custo para a criação de experimentos em Física Moderna. Estes trabalhos vão desde a construção de redes de difração com CDs (KALINOWSKI e GARCIA, 1990) ou cílios postiços (CAVALCANTE, 1998) até a produção de hologramas com equipamentos “caseiros” (GALLI, 1993) passando pela análise quantitativa de espectros (CAVALCANTE, 1999) e pela introdução da tecnologia avançada que faz uso dos cristais líquidos em mostradores de calculadoras, relógios digitais e joguinhos de bolso quebrados (LABURÚ *et alii*, 1998).

Tendo como base a metodologia utilizada em diversos cursos e oficinas, Tavolaro e Cavalcante (2003) elaboraram um livro que oferece algumas opções para a inserção da Física Moderna nas escolas. Neste livro, trabalha-se a Física Moderna como uma complementação à Física Clássica. O estudo dos temas sempre é iniciado com a análise de um experimento, seguido de um problema relacionado ao conteúdo. Tem-se aqui um bom manancial de recursos para professores e alunos de licenciatura. Mas, ainda que esta proposta seja voltada para um público amplo, a dificuldade da elaboração de muitos experimentos limita sua execução por alunos da escola média.

Portanto, estas são algumas das alternativas que buscaram, por meio de experimentos relativamente simples e acessíveis às escolas, apresentar recursos desenvolvidos com a intenção de auxiliar a introdução de tópicos de FMC no Ensino Médio.

Quanto aos livros didáticos, nota-se hoje uma tímida tentativa dos autores na adequação de temas de Física Moderna para o ensino em nível médio. Parece haver, no entanto, mais uma preocupação em estar de acordo com os PCNs do que realmente uma tomada de consciência sobre a necessidade de uma profunda reflexão pedagógica. Percebe-se, então, que os temas de FMC limitam-se aos últimos

capítulos do último volume das respectivas coleções. Posteriormente, neste trabalho, faremos um levantamento dos temas presentes em alguns dos livros didáticos mais usados no Brasil.

Mesmo com estas discretas tentativas de inovação, tem-se hoje, na grande maioria das salas de aula brasileiras, um ensino centrado na repetição, que não dá conta das diversidades de interesses e necessidades dos estudantes. Engessado em sua matriz clássica e tradicional, temos um currículo de Física propedêutico, que desconsidera fatores epistemológicos e pedagógicos.

Com a liberação da estrutura curricular promovida pela LDB de 1996 foi possível assistir, nos últimos anos, a uma gradativa redução do número de aulas de Física. Hoje, com pouco mais de 2 aulas semanais, nem mesmo a Física Clássica, que tem povoado os livros didáticos nos últimos 50 anos, pode ser mais amplamente ensinada no Ensino Médio. Assim, enquanto a pesquisa em Física avança vertiginosamente, a Física escolar retrocede ano após ano de modo que, às vezes, o curso do 1º ano restringe-se à cinemática e à dinâmica newtoniana. Para Pereira *et alii*:

Esses temas [de Física moderna] raramente entram no currículo 'real' das nossas aulas de física. Quando muito, são citados como curiosidades em momentos de descontração, sem compromisso com o currículo "oficial". (PEREIRA *et alii*, 1997, p.315).

Também é possível afirmar que ainda não existe uma avaliação definitiva sobre a forma efetiva de implementar estes conceitos no Ensino Médio. Há uma carência de estudos sobre metodologias, práticas e estratégias que busquem, de maneira eficiente, colocar tais conteúdos em sala de aula, saindo do âmbito das discussões e questionamentos. Sendo assim, urge que se faça uma eleição de prioridades que possibilitem a criação de um currículo condizente com os anseios e necessidades da sociedade moderna. Porém, não é preciso ressaltar que esta é uma escolha extremamente complicada.

Com relação a tópicos de FMC que devam ser ensinados no Ensino Médio, foi elaborada uma lista consensual surgida de um trabalho de Ostermann e Moreira realizado com físicos, pesquisadores em ensino de Física e professores do Ensino Médio. Nela, encontram-se os seguintes tópicos selecionados:

[...] efeito fotoelétrico, átomo de Bohr, leis de conservação, radioatividade, forças fundamentais, dualidade onda-partícula, fissão e fusão nuclear, origem do universo, raios X, metais e isolantes, semicondutores, laser, supercondutores, partículas elementares, relatividade restrita, Big Bang, estrutura molecular, fibras ópticas. (OSTERMANN E MOREIRA, 2000, p.44).

Entretanto, é preciso muito mais que elencar quais tópicos devem ser introduzidos no Ensino Médio. É necessária também a busca da implementação de um currículo que, além de suprir as necessidades dos estudantes de hoje, possa extinguir a visão linear, simplesmente acumulativa do desenvolvimento da ciência. Deve-se pensar qual a melhor maneira de fazer os alunos travarem contato com o mundo da pesquisa atual em Física, como fazê-los chegar a estudar a Física do século XX de forma que possam perceber o quanto estas idéias foram revolucionárias e que trouxeram mudanças para a ciência e para a própria humanidade.

Um currículo com uma tal orientação contribuirá para que o estudante aprenda e aprecie a forma como a física constrói descrições e explicações, as estratégias que são empregadas nesta área de conhecimento, como a Física constrói relações entre conceitos e fenômenos. (BORGES *et alii*, 1997, p.215)

Por fim, é preciso ressaltar a questão do caráter terminal do Ensino Médio. Este caráter último da formação média não se faz presente apenas para aqueles que terão a oportunidade de ingressar na Universidade. O Ensino Médio é a última oportunidade de contato com a ciência para a grande maioria dos estudantes. Mesmo entre aqueles que eventualmente seguirão cursos universitários, muitos são os que não abraçam carreiras das áreas científico-tecnológicas.

Como o Ensino Médio passa a ser a única forma de escolarização formal em Física, ao não se tratar de FMC priva-se o futuro cidadão, em face de tudo que foi discutido anteriormente, de tomar conhecimento desta nova maneira, criada pelo homem, de compreender e prospectar a realidade.

Neste nível de escolaridade devemos estar formando um cidadão, pronto para sua participação na sociedade. Sua formação deve ser global, pois sua capacidade de intervenção na realidade em que está imerso tem relação direta com sua capacidade de compreensão desta mesma realidade. (TERRAZZAN, 1992, p.92).

Os trabalhos decorrentes de quase duas décadas de pesquisas trouxeram a legitimidade necessária para o tratamento desta questão. Talvez a discussão em pauta atualmente deva centrar-se no "como fazer" e não mais no "por que fazer" ou "para que fazer".

Encontramos no trabalho de Terrazzan um trecho profetizado pelo Prof. João Zanetic que sinaliza isso:

O que não podemos é esperar a entrada do século XXI para iniciarmos a discussão nas escolas da Física do século XX. Utilizando a frase de um colega pesquisador em ensino de física, Prof. João Zanetic da USP, é fundamental que ensinemos a física do século XX antes que ele acabe. (TERRAZZAN, 1992, p.47).

Infelizmente, esta macabra “profecia” concretizou-se. Resta-nos buscar soluções de “como” promover essa atualização curricular, há tanto discutida, e a desejada transposição didática de conteúdos da Física Moderna.

A idéia central deste trabalho se baseia na tentativa de construir objetos de ensino plasmados em uma seqüência didática elaborada de modo que os alunos do Ensino Médio possam entender e construir representações para a realidade imposta pela FMC. Nosso desejo, talvez até ambicioso, é fazer com que estes alunos possam adquirir uma nova visão de mundo a partir de conteúdos dados na sala de aula. Com isso, queremos também resgatar esse importante papel da escola, há tanto tempo negligenciado.

Com relação à forma de se ensinar a Física, nossa tradição pedagógica dos últimos três séculos garante a construção de modelos adaptados ao ensino da Física Clássica. Porém, estes modelos perdem sua validade ao entrar no mundo das altas velocidades, no mundo do muito pequeno ou do muito velho. Para essas situações as referências do mundo perceptível são inadequadas. Necessitamos, assim, criar condições para que o aluno perceba o quanto a Natureza é mais sutil do que nossos sentidos são capazes de revelar.

1.2 – A necessidade do Ensino de Física Moderna

As pesquisas que tratam da inserção da Física Moderna no Ensino Médio cresceram nos últimos anos e levantaram inúmeras razões que justificam sua introdução. Estas justificativas são extremamente legítimas e diversificadas, indo desde o reconhecimento da Física como uma construção humana (ZANETIC, 1989), passando pelo interesse de atrair jovens para a carreira científica (STANNARD, 1990; WILSON, 1992) até a contribuição para uma mudança em nossa “visão de mundo” (FREIRE JR, 1995).

Hoje, basta entrar em qualquer grande loja de eletroeletrônicos para se ter certeza da inserção destas novas tecnologias no cotidiano da sociedade. Ao lado de televisores modernos, da década passada, com tubos de imagem com cerca de 40 cm de profundidade, encontram-se televisões ainda mais modernas, com apenas 10 cm de espessura. Isto sem contar os “antigos” CDs e os novíssimos DVDs. Se estes artigos não estão acessíveis à maioria da população é apenas por fatores econômicos, já que é possível o contato com estas tecnologias em comerciais veiculados pela mídia, sua presença nos filmes e novelas ou pela exposição nas lojas e revendedores.

Os videogames da década de 80 já não existem mais e seus substitutos só se assemelham a eles no deslumbramento e entretenimento que propiciam. Atualmente, estes videogames são supercomputadores feitos apenas com a finalidade de “rodar” jogos. Seus processadores chegam a ter uma performance extremamente mais eficiente que os da maioria dos computadores de uso doméstico (PC). Sua interface fica cada dia mais real, aposentando a antiga “bolinha quadrada” dos jogos da década de 80 e, também, alterando a percepção dos adolescentes que avidamente os utilizam.

De maneira semelhante, estas novas tecnologias têm aplicações cada vez mais freqüentes na medicina e, conseqüentemente, passam a desempenhar um papel extremamente significativo na vida dos indivíduos.

Hoje, qualquer neurologista, seguindo um procedimento padrão, pede uma tomografia computadorizada de um paciente que se queixe de uma dor de cabeça mais recorrente. Assim, a produção de imagens por tomografia de emissão de pósitrons (PET) ou imagens por ressonância magnética (MRI) estão cada vez mais sendo utilizadas e, desta forma, sendo incorporadas no cotidiano da sociedade moderna.

Mesmo tornando-se comuns, estes dispositivos causam a mesma estranheza e perplexidade que o uso dos raios X causava no final do século XIX. Da mesma forma que os raios X, essas novas tecnologias têm seu funcionamento embasado na Física Moderna e toda esta perplexidade vem do desconhecimento das propriedades básicas que estão por trás do funcionamento destes dispositivos.

Assim como a radiação é usada para diagnosticar tumores, aneurismas, disfunções em órgãos como tireóide e pulmões, ela também é utilizada no tratamento de câncer e de uma série de doenças degenerativas. Porém, o problema é que a radiação, além de atuar em células anormais, atua fortemente em células que se reproduzem muito rápido como as células capilares, sanguíneas e células do tecido que reveste o estômago e intestino. Daí a perda de cabelo e náuseas de pacientes em tratamento radioterápicos.

Isto evidencia uma face extremamente perigosa da radiação. O que regula esta relação custo/benefício são justamente a adequação e controle de seu uso. Sem o mínimo conhecimento dos processos envolvidos no funcionamento destes aparelhos, os indivíduos ficam à mercê dos especialistas e relegados à condição de meros consumidores.

Com isso, começa-se a discutir, no meio acadêmico, a necessidade de se iniciar, nas aulas de ciências, a construção dos elementos específicos do que veio a ser chamado de “alfabetização científica”. Este termo parece ter sido utilizado primeiramente por Hurd (1958), responsável por realçar que nas resoluções dos problemas no mundo real é preciso que haja uma combinação entre a observação, a ciência do conhecimento e a natureza da ciência. Assim, a alfabetização científica trata o conhecimento como algo necessário para a formação de cidadãos com maior autonomia e compreensão do mundo. Logo, para que seja possível a criação de cidadãos mais autônomos, surge a necessidade de as escolas desenvolverem em seus alunos a habilidade de reconhecer os termos, os conceitos e processos da ciência, bem como seu papel na sociedade.

Desta forma, o conhecimento científico pode ser encarado como uma ferramenta capaz de explorar e compreender o ambiente social por meio dos construtos da ciência. Assim, pode-se contribuir, a partir da inserção destes temas na grade escolar, para a introdução dos alunos à cultura científica. Isso significa gerar possibilidades de se trabalhar em uma perspectiva de elaboração de conceitos científicos mais coerentes, significativos e relevantes para o cotidiano (CAJAS, 2001).

Com isso, o currículo escolar possibilitaria aos estudantes adquirirem uma maior compreensão de seu próprio mundo. A partir disso, gradativamente, sua visão seria ampliada, gerando a compreensão do mundo como um todo, visto que associado a esse procedimento, também estaria sendo desenvolvida a sua capacidade de apropriação do conhecimento científico.

Não temos dúvida de que o ensino da Física por meio de uma abordagem que considera o papel da tecnologia é fundamental. Tem-se, ao tratar o conteúdo teórico a partir de situações retiradas do dia-a-dia do aluno, uma maior possibilidade do estabelecimento de vínculos com o seu cotidiano.

Entretanto, é necessário cautela ao focar o ensino de ciências por esse viés. A partir desta visão, não há espaço para se tratar aqueles conhecimentos físicos que têm uma relação mais distante com o cotidiano. Ainda que seja uma visão pobre, é indiscutível que não é preciso necessariamente compreender o funcionamento interno de qualquer aparelho para utilizá-lo. Fosse somente isso, seria mais útil aprender a trocar uma lâmpada do que discutir qual é a natureza da luz. Além disso, é necessário no Ensino Médio proporcionar momentos em que o conhecimento seja visto de outra maneira, considerando-o também como uma fonte de prazer (ROBILOTTA, 1986).

Existem outros modos (além do racional) de conhecer o mundo físico, é possível um relacionamento do tipo 'sentimento'. Um tal modo de conhecer é caracteristicamente não formal, pode ser não verbal e acontece num mundo de coisas às quais se atribui um certo grau de 'realidade'. O acesso a esse mundo é feito por meio de sensações, palavras, imagens e intuição, e a mente busca a intimidade do objeto a ser conhecido. Neste tipo de conhecimento não existe a clareza fria da razão. (ROBILOTTA, p.8, 1986).

Seria fundamental que a escola também preparasse cidadãos que, além de conhecer as ciências, fossem capazes de apreciá-las, da mesma forma que os deveria preparar para apreciar as artes, a música e a literatura. Ou seja, o Ensino Médio deve preparar os alunos para entender e apreciar os mais diversos aspectos da cultura, entre eles a ciência (ZANETIC, 1989), retirando-a do patamar do utilitarismo. Um ensino voltado também para a apreciação da ciência poderia ser, então, motivador, divertido, interessante, agradável sem a preocupação exacerbada de transformar o conhecimento em utilidade. Poder-se-ia, assim, trabalhar o aprender pelo prazer de conhecer.

Como muito dos temas de FMC não têm uma aplicação direta, pode-se trabalhar mais essa dimensão “contemplativa”, prazerosa do conhecimento, focando os processos da ciência, suas motivações, seus problemas e questionamentos. Assim, pode-se discutir questões fundamentais da construção das teorias e suas relações com a realidade, na tentativa de desenvolver nos alunos a satisfação intelectual que se tem ao compreender esses assuntos.

Ainda que não estejam presentes nas salas de aula, os jovens travam contato com estes temas em revistas de divulgação ou jornais. A possibilidade de trabalhar tais assuntos nas escolas pode ser instigante e estimulante (WILSON, 1992). Entretanto, com relação à maneira com que a FMC é tratada, pode-se notar, com pesar, que na maioria das vezes têm-se considerações distorcidas e deformadas. Não só em materiais de divulgação científica como em livros didáticos, sua abordagem é amplamente revestida com o véu do mistério.

Às vezes, alguns materiais de divulgação científica tratam situações tiradas da Física Moderna como uma “curiosidade”, com a dimensão de fantástico, de incrível, fazendo com que os fundamentos ali relatados possuam um caráter essencialmente efêmero. Desta forma, o interesse despertado em um aluno ao ler este tipo de divulgação mantém-se apenas em seu contato inicial, perdendo consistência com o passar do tempo.

Além disso, o aspecto extremamente negativo que acompanha esta forma de tratamento de conceitos mais complexos é a criação de estereótipos. Conduzida desta maneira, a Física Moderna passa a ser, como dizem os próprios alunos, “coisa de doido”, “coisa de gênio”, contribuindo para a sua mistificação e o fortalecimento do estereótipo do cientista maluco, genial, afastando os alunos que se sentem simplesmente “normais”, fazendo-os sentirem-se, assim, impossibilitados de aprender conceitos mais abstratos.

É necessário, então, que o ensino de Física seja capaz de integrar o aluno ao invés de excluí-lo. A Física Moderna deve ser mostrada como uma construção humana, menos mística, e deve ser ensinada de forma que os alunos sejam seduzidos por ela, e não rejeitados. É imprescindível não apenas que ela seja acessível, mas, principalmente, que seu entendimento passe a ser desejado, descartando sua apresentação meramente informativa.

Quanto à possibilidade de influência dos temas modernos nas decisões dos alunos, Stannard (1990) mostra um levantamento com uma série de universitários,

revelando que são justamente os temas relacionados à FMC os fatores de maior influência na decisão destes jovens de escolherem a Física como carreira. Com isso, a chance de que estes estudantes fiquem cada vez mais interessados por estes tópicos cresce a cada período da graduação, salvo quando alguns professores conseguem acabar quase que completamente com esse interesse.

Futuramente, estes estudantes (licenciados e bacharéis), em sua maioria, em algum instante, acabarão em uma sala de aula. Poder-se-ia, assim, haver professores capazes de levarem consigo, para o Ensino Médio, seu encantamento por estes tópicos tão instigantes, acompanhados da nova “visão do mundo” intrínseca a eles. Entretanto, na maioria das vezes, por despreparo, ou descaso com o Ensino da Física, tem-se nos cursos de graduação uma imensa quantidade de professores universitários que fazem como Ulisses, na “Odisséia” de Homero. Temendo que seus marinheiros fossem seduzidos pela beleza do canto das sereias e, assim, levados à morte, Ulisses tapou-lhes os ouvidos com cera. Porém, pediu que eles o amarrassem ao mastro do navio, pois assim, poderia se deliciar ouvindo o canto das sereias sem correr o risco de atirar-se ao mar e morrer afogado.

Infelizmente, como o capitão deste barco, os professores universitários, responsáveis por formar aqueles que atuarão no Ensino Médio, sacrificam seus alunos, não os permitindo ouvir o belo canto das sereias e, o que é pior, nem lhes dando a chance de escolher se querem ou não ouvi-lo! Com isso, o professor universitário, geralmente pesquisador, segue apaixonado e estudando FMC enquanto passa quase todo o tempo lecionando apenas a Física Clássica, na grande maioria das vezes sem qualquer preocupação didática ou pedagógica. A desesperança só não se aloja por completo no âmbito do Ensino de Física, pois é possível encontrar exceções. Professores capazes de compreender o seu papel de formador, conscientes da necessidade de ir além do domínio teórico daquilo que leciona se se deseja educar e alicerçar futuros educadores.

Em decorrência do acima exposto, nota-se que os alunos têm poucas chances de fazer uma re-leitura da realidade em que vivem e permanecem com a falsa impressão de que a Natureza é determinística, como as Leis de Newton na mecânica. A descrição quântica da Natureza torna-a absurda comparada com o senso comum. Mas este absurdo pode se tornar delicioso quando se percebe que se trata de uma outra maneira de representar a realidade, forçando-os a irem além de seus próprios limites ao tentarem compreender o que a Natureza lhes esconde. É preciso,

então, fazê-los perceber que “*A natureza não esconde seus segredos por malícia, mas sim por causa da própria altivez*” (EINSTEIN *apud* PAIS, 1982).

Por isso é primordial que o Ensino de Física seja capaz de trazer para as salas de aula a discussão acerca da realidade como um todo e não apenas a realidade vista nos livros e práticas escolares. É necessário, assim, que o Ensino de Física forneça os recursos suficientes para que os alunos possam refletir sobre o processo científico e compreender os diversos aspectos da realidade que o cercam.

Desta forma, urge a implementação de estratégias de ensino que possibilitem trazer para o Ensino Médio discussões e explicações capazes de dar conta do mundo que foge dos sentidos imediatos: do mundo do muito rápido, do muito antigo ou do muito pequeno. Para isso também é necessária a construção de modelos pedagógicos capazes de superarem os limites da representação do formalismo matemático que fazem somente com que as equações dêem sentido ao mundo. Com isso, estes modelos devem possibilitar aos estudantes do Ensino Médio utilizar outros recursos para a representação necessária do mundo quântico.

Ilustro isso com a narração de uma experiência pessoal, na qual um garoto de quatorze anos de idade me faz uma pergunta sobre o funcionamento de um computador quântico. De imediato notei que sua dúvida havia surgido de um artigo que houvera lido na Internet. Tentando investigar até onde esta pergunta era uma dúvida genuína ou apenas uma reprodução do artigo constatei o que já era esperado: certamente ele não sabia nada sobre a teoria quântica. Contudo, o que me espantou foi o inesperado: a facilidade da compreensão que ele possuía da lógica binária, o princípio fundamental do funcionamento de um microcomputador. Ele não tinha como associar os estados quânticos ao código binário, mas me explicou de maneira muito coerente e, principalmente, bem interiorizada a relação de 1 e 0 com as informações geradas no computador, revelando-me um domínio razoável da teoria.

Esse é um caso corriqueiro que contribui para jogar por terra a idéia que, às vezes, se tem da impossibilidade de tratar de tópicos de Física Moderna, imaginando ser impossível o domínio de teorias complexas, ou ao menos o seu entendimento por garotos dessa idade. Não levar em conta a capacidade de abstração destes jovens, suas capacidades cognitivas transformadas cada vez mais pelas tecnologias que os cercam é mais que negligência. É um desmerecer cheio de preconceito e descrédito.

Levando em conta o que foi discutido, elaboramos, implementamos e avaliamos um curso de introdução de elementos de Física Quântica, com a finalidade

de inserir a FMC no Ensino Médio. A intenção principal foi a construção de uma sequência didática capaz de conduzir, de maneira coerente e inteligível, ao estudo da dualidade onda-partícula. Nosso intuito foi o de que, ao final do curso, os alunos fossem capazes de re-interpretar a luz, perceber a dinâmica da ciência e as implicações de suas criações com a realidade. Portanto, nosso desejo foi possibilitar que os alunos criassem uma ferramenta para uma nova leitura do mundo.

1.3 – Como compreender a Física Moderna

A palavra compreender normalmente está associada à idéia de fazer sentido. Assim, compreender uma coisa, ou conceito, significa encaixá-la em algo que já se sabe ou acredita, para que ela passe a ter significado. Como fruto de um desejo intrínseco de segurança, são necessários conceitos bem familiares e bem conhecidos para que, a partir deles, se possa entender algo desconhecido.

A essência do processo de aprendizagem significativa é que as idéias expressas simbolicamente são relacionadas às informações previamente adquiridas pelo aluno através de uma relação não arbitrária e substantiva (não literal). Uma relação não arbitrária e substantiva significa que as idéias são relacionadas a algum aspecto relevante existente na estrutura cognitiva do aluno, como, por exemplo, uma imagem, um símbolo, um conceito ou uma proposição. (AUSUBEL *et alii*, 1980, p.34)

Porém, o que significa compreender quando se depara com algo realmente novo? Além de se ficar inicialmente surpreso, não se tem onde “encaixar” esta novidade em tudo o que já foi experimentado. Assim, talvez, além da surpresa, o sentimento mais forte que surja seja o de resistência. Dito isso, é fácil entender o quanto é difícil aceitar algo realmente novo, pois este não fará sentido já que não tem “onde se apoiar”, violando o senso comum.

A ciência, face a toda sua especificidade, exige uma forma específica de compreensão. Na Física, compreender está intimamente ligado a enxergar as intrincadas relações que existem entre fenômenos aparentemente distintos e elaborados sistemas conceituais. Desta forma, as “coisas” da Física só fazem sentido dentro de um sistema de relações bem definidas. (ROBILOTTA, 1985)

No dia-a-dia, as observações são pautadas, em sua maioria, pelo uso dos sentidos e da percepção. A visão passa a ser o sentido predominante nas observações, de forma que o senso comum atesta que, geralmente, sempre faz mais sentido aquilo que se vê. Porém, a ciência envereda por caminhos onde impede, na maioria das vezes, de se utilizar a visão como muleta da razão. Desta forma a razão precisa, e deve, caminhar com suas próprias pernas, mas também acompanhada pela imaginação.

Na verdade, o que a ciência exige é a reconstrução daquilo que se deseja conhecer. Ela pede que se “sinta” esse objeto de conhecimento. Segundo Fogel:

“[...] ao conhecer, com o conhecimento eu participo das coisas. Eu ‘comungo’ delas – tenho com elas uma espécie de abraço fraternal! Portanto, o conhecimento é uma espécie de confraternização com as coisas, com o contorno, com o mundo! [...] No processo ou, talvez e melhor, no ato do conhecimento eu como que fico ou me torno ‘calmo’, ‘tranquilo’, ‘feliz’ – e isso porque, no fundo, com o conhecimento e através dele [...] tenho a ‘**sensação**’ de segurança, de certeza, melhor ainda, de auto-asseguramento. Enfim, no conhecimento e através dele eu como que ‘perco o medo’, me ‘safo’ da ameaça que são para mim as coisas, o mundo – quer dizer, o desconhecido, o não-sabido”. (FOGEL, 2003, p.16, grifo nosso).

Agora, sentir denota criar conexões, relações. Entretanto, as experiências sensíveis deixam de ser suficientes para esse tipo de compreensão. Assim, há uma necessidade de se desconfiar daquelas representações apreendidas somente com os sentidos. É preciso que haja uma combinação entre os sentidos internos, a razão, e os sentidos externos, os sentidos visuais, táteis...

O intelecto utiliza a matemática como forma de criar condições necessárias para explorar, e ao mesmo tempo construir, estes tortuosos caminhos por onde a ciência anda. Para Pinheiro:

Ela [a Matemática] fornece um conjunto de estruturas dedutivas, por meio das quais se expressam as leis empíricas ou princípios teóricos. Nesse contexto, ela é uma forma de linguagem e ferramenta, por meio da qual são estruturadas as relações entre os elementos constituintes de uma teoria. (PINHEIRO *et alii*, 2001, p.40).

O papel da Matemática no desenvolvimento das pesquisas físicas se modificou ao longo dos tempos, sendo considerada como uma simples ferramenta do empiricismo ou, em outro extremo, como a própria essência da realidade¹. Foge do escopo deste trabalho aprofundarmos nesta discussão, contudo consideramos a Matemática como *estruturante* do conhecimento físico (PIETROCOLA, 2002a).

Hoje, é incontestável que a Matemática exerce também um papel fundamental no momento da divulgação das pesquisas. Um cientista ao perceber e compreender as relações existentes atrás de certos fenômenos sabe que necessita divulgá-las a seus pares. Desta forma, reconhecendo que as palavras não têm a precisão necessária para esse tipo de divulgação ele recorre, então, à matemática,

¹ Uma discussão aprofundada acerca do papel da Matemática na construção e ensino da Física pode ser encontrada em PATY, 1989 e PIETROCOLA, 2002.

utilizando-a como sua linguagem. Contudo, o termo “linguagem” tem uma conotação distinta da maneira com que usualmente é utilizado. Segundo Pietrocola:

Ao dizer que a Matemática se constitui na linguagem da ciência, devemos analisá-la como expressão de nosso próprio pensamento e não apenas como instrumento de comunicação. A Matemática é a maneira de estruturarmos nossas idéias sobre o mundo físico, embora possa, em determinados momentos, assemelhar-se a uma simples descrição de objetos.[...] No entanto, sua maior importância está no papel estruturante que ela pode desempenhar no processo de produção de objetos que irão se constituir nas interpretações do mundo físico. (PIETROCOLA, 2002a, p.106).

Então, toda a coerência fornecida pelo formalismo matemático traduz, de forma inequívoca, a maneira de a ciência se expressar, construir e estruturar seu pensamento, desempenhando um papel fundamental na constituição do conhecimento físico. O matematicismo e o poder de seu simbolismo chegariam ao ápice com a criação das modernas teorias físicas.

As teorias clássicas da física deram lugar a uma nova maneira de enxergar o mundo a partir da primeira metade do século XX. Surgia a Mecânica Quântica, que não só parecia estar em desacordo com toda a física construída até então, como se mostrava, e ainda mostra, em total desacordo com o senso comum. A Física Quântica passa então a ser um desafio ao entendimento. Ela traz a noção de que a Natureza parece estar além da imaginação, ou seja, para que realmente se possa entendê-la é necessário que se criem representações de “coisas” que não são possíveis de serem exatamente imaginadas!

Isso impõe a criação de novas idéias, novos pensamentos e, principalmente, uma nova percepção das coisas. O papel imprescindível do uso da imaginação na ciência pode ser encontrado na obra de um dos maiores físicos que o mundo conheceu: Richard Feynman, que além de sua competência era reconhecido por sua criatividade e poder imaginativo:

Eu lhes peço que imaginem os campos magnéticos e elétricos. O que fazem? Sabem como? Que eu vejo normalmente? Quais são as exigências da imaginação científica? É algo diferente de imaginar uma sala cheia de anjos invisíveis? Não, não é como imaginar anjos invisíveis. É necessário um grau maior de imaginação para compreender o campo eletromagnético que para compreender anjos invisíveis. Por quê? Porque para se compreender os anjos invisíveis, tudo o que tenho que fazer é alterar suas propriedades um

pouquinho – imagino-os ligeiramente visíveis e então posso ver as formas de suas asas e de seus corpos. Uma vez que consigo imaginar um anjo visível, a abstração necessária – que torne os anjos quase invisíveis é imaginá-los completamente invisíveis – é relativamente fácil. Então vocês dirão: “professor, me dê uma descrição completa de ondas eletromagnéticas, embora seja ligeiramente inexata, de modo que eu possa vê-las como posso ver os anjos invisíveis.” Eu sinto que não posso fazer isso. Não sei como fazê-lo. Não tenho nenhuma imagem do campo eletromagnético que de algum modo seja precisa. [...] Nossa ciência apresenta terríveis dificuldades de imaginação. O grau de imaginação necessário é muito mais extremo que o necessário para algumas idéias antigas. As idéias modernas são muito difíceis de imaginar. E usamos muitas ferramentas. Usamos equações e regras matemáticas e construímos um montão de imagens. [...] Se deve ter suficiente imaginação para se conceber algo que nunca tenha sido visto ou ouvido. (FEYNMAN, 1964, p.20-9)

A ciência impõe então uma nova forma do homem se relacionar com a natureza. Surge, por exemplo, no contexto da Mecânica Quântica, idéias como: saltos quânticos, interação observador-observado, não-causalidade, indeterminismo etc. exigindo uma revisão profunda das concepções de ciência e sua capacidade de construção de imagens da realidade.

Com o surgimento dos conceitos quânticos deu-se início uma série de controvérsias acerca de suas interpretações. Tanto os objetos criados pelos físicos quanto as teorias propostas geraram profundos debates de cunhos filosóficos e epistemológicos. Estes problemas interpretativos são contemporâneos ao surgimento da teoria quântica e foram amplamente discutidos pelos gigantes da física que, em sua maioria, contribuíram para a construção do que viria a ser conhecido por Física Moderna. Entretanto, em meio a estes debates “filosóficos” era possível perceber que havia um consenso quanto ao instrumental matemático utilizado. Para Freire Jr.:

Uma grande divergência quanto à interpretação da teoria quântica, convivendo com uma ampla unanimidade quanto ao uso dos formalismos desta teoria, tem constituído, neste últimos 70 anos, uma controvérsia prolongada. Estes formalismos, que podem ser agrupados em algoritmo de quantização e algoritmo estatístico, são hoje objeto de mais amplo consenso entre os físicos. (FREIRE JR, 1999, p.2)

Este consenso foi, e ainda é, consolidado em decorrência dos sucessivos e generalizados êxitos da Mecânica Quântica. Desse modo, passou-se a ser exigido que

esta nova teoria apenas fosse capaz de descrever quantitativamente os dados experimentais. Daí a ênfase dada ao formalismo matemático. Com uma estrutura matemática coerente, forte e autocontida, os físicos eram capazes de se esquivarem dos problemas filosóficos e epistemológicos que a interpretação destes novos conceitos trazia. Contudo, as inquietações advindas das interpretações dos resultados não foram totalmente silenciadas. Segundo Freire Jr.:

A partir da década de 50 a comunidade dos físicos aprendeu a coexistir com a controvérsia, institucionalizando-a. Assim, são realizados encontros dedicados especialmente ao tema e revistas, como a 'Foundations of Physics', foram criadas para dar vazão a este debate. (FREIRE JR, 1999, p.5).

Logo, em face à natureza, no mínimo, estranha dos conceitos revelados pela Física Quântica e, principalmente, pela ruptura que se deu com os já cristalizados conceitos da Física Clássica a comunidade científica adotou uma atitude pragmática.

Entrementes os físicos têm, com êxito, estendido, aplicado e comprovado a teoria básica, prosseguindo em seu trabalho diário sem prestar atenção ao lastro filosófico. (BUNGE, 2000, p.231).

Assim, como esta teoria descrevia de maneira notável as evidências experimentais do mundo microscópico, esse “mal estar” interpretativo, que pode ainda ser encontrado, entre tantos exemplos, foi deixado de lado permitindo que a Mecânica Quântica avançasse independentemente das divergências filosóficas e epistemológicas.

Com relação à descrição matemática e suas interpretações, Werner Heisenberg, enquanto jovem, revela suas preocupações sobre sua compreensão da Teoria da Relatividade em uma conversa com Wolfgang Pauli, em 1921, numa hospedaria em Grainau. Heisenberg, um dos principais arquitetos da Mecânica Quântica, ao refletir se finalmente houvera compreendido a teoria de Einstein, diz o seguinte:

Sinto-me meio ludibriado pela lógica implícita nesse arcabouço matemático. Talvez você possa até dizer que aprendi a teoria com o cérebro, mas não ainda com o coração. (HEISENBERG, 2000, p.42)

Embora Heisenberg tenha se expressado desta forma em relação à Relatividade, curiosamente ele parece ter abandonado, ao menos durante um longo período, a necessidade da compreensão dos elementos da Mecânica Quântica além

do arcabouço matemático, aproximando-se do *operacionalismo*². Heisenberg passa, em sua formulação da teoria quântica, a utilizar a terminologia *observáveis* (para indicar as grandezas representativas dos sistemas) para enfatizar a idéia de que apenas as quantidades mensuráveis devem ser introduzidas na Física. Entretanto, os valores desses observáveis são determinados, ou mesmo definidos, a partir de operações experimentais (BUNGE 2000). Nas palavras de Heisenberg:

[...] a função de probabilidade não pode ser ligada à realidade a não ser que (...) uma nova medida seja feita (...); “A transição do ‘possível’ ao ‘real’ ocorre durante o ato de observar”; É preciso lembrar que o que observamos não é a Natureza sem si, mas a Natureza exposta ao nosso método de investigação. (HEISENBERG *apud* PATY, 1995, p.144)

Segundo Bunge, o operacionalismo tornou-se a filosofia vigente nas universidades e centros de pesquisa:

O estudante de física absorve a filosofia operacionalista logo desde o início: encontra-a nos livros de texto, nos cursos e nas discussões de seminário. Raramente encontra alguma inquirição crítica desta filosofia, porque este exame é habitualmente feito por filósofos, que ele não lê. Além disso, se se sente tentado a criticar a filosofia das ciências oficial, cedo descobrirá que esperam que não o faça. O operacionalismo é credo ortodoxo e todo desvio a seu respeito virá provavelmente a ser escarnecido ou mesmo punido. (BUNGE, 1973, p.12).

Assim, de modo geral, segue-se estudando e pesquisando a Física sem refletir acerca dos problemas filosóficos e epistemológicos intrínsecos à construção de cada teoria. Isso não quer dizer que estes problemas não sejam percebidos ou que, ao menos intimamente, perturbe algum pesquisador. Acontece que

Esses problemas, porém, são geralmente varridos para baixo do tapete pela maioria dos físicos; no entanto, penso que sujeira debaixo do tapete continua sendo sujeira. (REDHEAD, 1997, p.22).

Parece, então, não ter sido realmente necessário para os físicos a compreensão dos conceitos quânticos além da descrição matemática. E no ensino desta física? Deve-se fazer o mesmo?

² Operacionalismo: pode ser entendido no contexto de uma filosofia pragmática da ciência. Esta filosofia sustenta que todo construto só tem significado físico na medida em que diz respeito a uma operação possível. Para Bunge, “a idéia de sujeitar a teoria à técnica de medida exerceu um efeito mutilante nas ciências naturais, alijando construtos de alto nível que não poderiam possivelmente estar ligados a operações operacionais”. (BUNGE, 2002).

Esta atitude pragmática é a que impera na imensa maioria dos cursos de graduação em Física. Assim, passa-se aos universitários a falsa impressão de que apenas dominando todo o formalismo matemático necessário à descrição quântica certamente seus conceitos serão compreendidos, ou pior, que estes conceitos são de compreensão dispensável. Bunge critica, com uma dose de ironia, esta forma de tratar o ensino da Mecânica Quântica ao dizer que:

Pode-se admitir que a Mecânica Quântica é nebulosa e, algumas vezes, faz-se disso uma virtude, argumentando que os eventos quânticos são, no fim de contas, opacos à razão (Bohr, 1934) e que devemos considerar-nos felizes se, sem compreender no sentido clássico do termo, conseguirmos calcular previsões obtidas pela observação e pelo experimento. (BUNGE, 1973, p.98).

Para aqueles que desejam ir além do formalismo matemático é comum sentirem-se confusos quando os problemas filosóficos e epistemológicos afloram, visto que:

Mesmo com os avanços das discussões epistemológicas dos últimos anos, ainda não é consenso, nos cursos de graduação em Física do país – Licenciatura e Bacharelado, a oferta de pelo menos uma disciplina de cunho epistemológico. Não será essa lacuna um dos problemas da educação em Ciências e Tecnologia? (ANGOTTI, 2002, p.130)

Logo, como na imensa maioria das vezes não há espaços para o tratamento de questões acerca, por exemplo, da realidade descrita pela quântica ou a ontologia de seus objetos e modelos teóricos, é comum aos estudantes desistirem de fazer tais reflexões e abraçarem o pragmatismo que cega. Para Bunge:

Muita dessa confusão é agudamente sentida pelo principiante, mas o profissional aprende a viver com ela. O último habitua-se, de facto, a manipular um instrumento conceptual que manifestadamente não compreende: ocasionalmente, chega a afirmar que a ânsia de compreender é um resto pecaminoso da física clássica. (BUNGE, 1973, p.97).

Não é o foco deste trabalho discutir se esta vem ou não a ser a melhor forma de tratar a Física Quântica no ensino superior. Porém, acreditamos que no Ensino Médio a busca por uma forma de compreensão dos conceitos quânticos deva começar a partir de uma reflexão epistemológica.

Na Física Moderna há uma violação do senso comum, de modo que as teorias modernas representam “*por suas características conceituais e estruturais, um*

sério desafio à intuição física ordinária” (CHIBENI, 1997, p.4). Fica-se imerso em um mundo desconhecido, sem a ajuda de experiências prévias, sendo extremamente difícil relacionar o novo àquilo que já se conhece. Desta forma, compreender o mundo passa não só a deslumbrar quanto a assombrar o intelecto, e isso obriga o estabelecimento de uma nova relação com o conhecimento da realidade. Ao se desejar compreender o mundo físico é imprescindível que se estabeleça um outro tipo de relação com ele. A Mecânica Quântica permite a apreensão do mundo em outros termos, gerando uma nova concepção, que vai muito além da mera admiração.

Necessita-se, assim, criar condições para que os alunos sejam capazes de trabalhar a criação de representações, de forma que possam depois se apoderar daquelas fornecidas pela ciência. Acreditamos na utilização de estratégias que permitam aos alunos fazerem uso de seus mecanismos cognitivos de forma que possam construir modelos que os façam acessar uma realidade desconhecida. Assim, tem-se a chance de dar a eles ferramentas e conceitos que possam fazê-los entender e compreender melhor esse novo mundo.

É necessário que se possibilite aos alunos perceberem a satisfação intelectual envolvida no processo de compreensão desta nova Física. Este tipo de recompensa não pode ser medido, mensurado, justamente por ter um valor inestimável para o homem. Trabalhar estes tópicos exige que se faça uso da abstração de uma maneira muito diferente daquela presente no ensino tradicional. Dessa forma, precisam-se buscar maneiras de desenvolver a imaginação dos alunos para que seja possível a compreensão de conceitos quânticos. Acreditamos, por isso, ser necessário transformar o modelo pedagógico que temos hoje. É preciso obter representações que permitam uma transição entre o novo e o cristalizado. Criar um mediador entre o que já se crê e sabe e aquilo que parece ser impossível de existir. Talvez a única magia contida na FMC deva surgir no momento em que se enfrenta o desafio de ensiná-la.

1.4 – Representações do mundo físico

“Contra o positivismo, que pára perante os fenômenos e diz: “Há apenas fatos”, eu digo: Ao contrário, fatos é o que não há; há apenas interpretações.”

Nietzsche

Sempre que se necessita entrar em contato com o mundo há a obrigatoriedade da construção de representações sobre ele. De uma forma simplista, interagir com o mundo resume-se em incorporar e construir representações sobre as coisas e buscar relações entre elas. Estas representações são extremamente simples inicialmente e vão ficando cada vez mais elaboradas de acordo com o desenvolvimento de nossa estrutura cognitiva (CUSTÓDIO, 2002). Desta maneira, nossas representações são formas de apreensão do real (PATY, 1995; BUNGE, 1973).

No processo de construção destas representações faz-se uso dos sentidos, da percepção e de experiências pessoais. Porém, como já dito, a forma de representação imposta pela ciência requer precisão e complexidade que ultrapassam os sentidos, o que impede de se ser guiado apenas por eles.

Sendo assim, a capacidade dos indivíduos em construir representações do mundo que os cerca não é regida, nem determinada, apenas por suas observações imediatas do real percebido. Esta construção também requer o uso de conhecimentos teóricos prévios, mesmo que inicialmente rudimentares. Isso explica porque um cientista observando as mesmas coisas que um leigo é capaz de fazer uma leitura totalmente diferente do que viu. O cientista não se apóia unicamente em seus sentidos. Ele é capaz de avaliar a situação utilizando muito mais que simplesmente sua intuição e percepção, fazendo uso de elaborados sistemas conceituais previamente incorporados.

A ciência necessita de formas de representação distintas daquelas que usualmente fazem tais representações. Para um cientista a forma de olhar é extremamente mais importante que o próprio ato de olhar. Fazendo uso das teorias científicas, que são construções de sistemas conceituais que permitem compreender o mundo físico (BUNGE, 1974), os cientistas são capazes de fornecer uma representação teoricamente comprometida da porção da realidade a que se referem.

Kant diz, em sua *Crítica da razão pura*, que:

Quando Galileu fez com que bolas de peso previamente determinados rolassem num plano inclinado; quando Torricelli atribui ao ar um peso que, segundo seus cálculos, era igual ao peso de uma coluna definida de água; [...] uma luz raiou sobre todos os estudantes de ciência. Eles aprenderam que a razão só pode compreender aquilo que ela mesma produz de acordo com um plano que ela mesma elaborou. A razão não pode deixar-se arrastar pela natureza. Ao contrário, é ela que deve mostrar o caminho [...] obrigando a natureza a dar respostas às questões que ela mesma propôs. [...] A razão, assim, se aproxima da natureza não como um aluno que ouve tudo o que o professor se decide a dizer, mas como um juiz que obriga a testemunha a responder questões que ele mesmo formulou. (KANT, prefácio da 2ª edição).

Assim, é necessário que se busque um ensino que cause uma diminuição da carga intuitiva guiada pelo senso comum, pois no ambiente científico somos obrigados a utilizar um outro guia, que possui suas regras próprias de caminhar. É preciso, então, criar situações de ensino que gerem uma ampliação da base teórica de toda observação, transformando a maneira do aluno perceber e se relacionar com o mundo.

Quando se olha para os campos da FMC as representações do cotidiano não servem mais, sendo que agora é necessária a intermediação feita pela ciência. Na Física Moderna, os modelos familiares deixam de ser operantes, pois não se têm como construir representações a partir deles.

Para um físico isto não representa um obstáculo visto que a matemática utilizada na descrição destes modelos teóricos é suficiente para que ele faça uma representação daquela realidade. Segundo Pietrocola, no âmbito das teorias modernas:

[...], a Matemática impera solitária, amparando nosso pensamento para atingir o entendimento do mundo. Sem ela, seríamos como cegos tateando num mundo repleto de cores. (PIETROCOLA, 2002, p.110).

Desta forma, para um físico, ao olhar para uma equação, imediatamente há uma intermediação entre ela e o que ela pretende representar. Porém, resta saber se os alunos devem pagar o alto preço de dominar esta matemática avançada para que possam fazer uma re-interpretação do mundo em que vivem. Talvez aqui esteja a

razão pela qual se discute a inserção de tópicos de FMC no ensino médio há quase duas décadas, porém com implementações incipientes em sala de aula.

A Física foi construída não só para representar a realidade. Ela também tem o papel fundamental de interpretá-la. Isso fica claro durante toda a construção do corpo de conhecimentos gerado por ela. Assim, o ideal da física apesar de intimamente ligado ao real percebido é muito diferente dele. Como se trata de um recorte da realidade, muitas vezes tem-se a ingênua idéia de que, então, seria mais fácil apreender uma teoria que a própria realidade. Entretanto, a ciência implica um realismo mais crítico, pois se sabe que os sentidos e percepções nem sempre são suficientes para a leitura e interpretação da realidade.

A ciência supõe que as aparências não são um indício suficiente nem seguro da realidade e que esta inclui elementos que podem estar além delas. (CUPANI E PIETROCOLA, 2002, p.101).

Porém, construir uma representação desta porção estudada requer uma forma de pensar e agir bem diferente da maneira corriqueira que se pensa e age. É necessário que se mude a forma de pensar o mundo. Paradoxalmente, parece haver a necessidade de se afastar da realidade para que seja possível aproximar-se dela.

2. A realidade na Mecânica Quântica e suas implicações para o Ensino de Física

There is no spoon.

The little Buda Boy (The Matrix)

Este capítulo tem por objetivo apresentar, de maneira sucinta, algumas das principais questões envolvidas nos debates filosóficos e epistemológicos advindas com o surgimento da Mecânica Quântica. Para isso, iniciaremos com um breve resumo do desenvolvimento desta teoria a fim de situar os principais fatos que originaram os problemas evidentes desde a criação da Física Quântica.

Como exposto no capítulo anterior, a Teoria Quântica tem a peculiaridade de estar estruturada em um formalismo matemático consensual, porém guarda profundas e sérias dissidências, mesmo entre seus fundadores, acerca das suas interpretações. As controvérsias originaram uma grande cacofonia tornando o diálogo entre os físicos quase impossível. Ainda que cientes do desafio de discutir os enormes e complexos problemas filosóficos envolvidos nestas interpretações, optamos por enfrentá-lo, pois acreditamos que para o ensino da Física *“nossa tarefa é a de explorar Babel e não a de deplorar sua existência.”* (BUNGE, 2000, p.37).

Sendo assim, após o relato histórico, baseados nos trabalhos de Pessoa Jr. (2003), apresentaremos quatro interpretações sistematizadas da Mecânica Quântica, evidenciando seus problemas, suas divergências, com o intuito de ressaltar, assim, as principais questões (relevantes para o nosso trabalho) que permeiam o embate filosófico e epistemológico. É preciso adiantar que as discordâncias entre as diferentes escolas de pensamento dentro da comunidade acadêmica são bastante extensas, influenciadas não só por fatores teóricos, mas também por elementos sociais e culturais, de modo que um tratamento aprofundado foge à extensão deste trabalho.

Em seguida, será abordada neste capítulo uma discussão sobre o realismo científico a fim de mostrar como a Física Quântica fornece elementos capazes de aprofundar a compreensão da realidade física. cremos que seja de suma importância a presença destes elementos filosóficos e epistemológicos nas salas de aula, possibilitando não só a introdução de FMC no Ensino Médio, como também a construção de uma nova forma de os alunos compreenderem a ciência, seus

processos e sua validade, o que justifica sua discussão nesta dissertação, ainda que de maneira abreviada.

Por fim, serão apresentados alguns argumentos que intencionam desvelar a pertinência destas discussões no contexto escolar. cremos que é possível encontrar nestas controvérsias uma excelente forma de introdução de elementos fundamentais da Física Quântica no Ensino Médio. Além disso, é possível, a partir das discussões sobre as diferentes interpretações, fugir do dogmatismo que tanto paralisa a aprendizagem significativa dos conceitos físicos.

Sabemos que são inúmeros os problemas epistemológicos e filosóficos suscitados pela teoria quântica e, em geral, de elevada extensão e complexidade, requerendo, para uma compreensão aprofundada, um alto grau de conhecimento da teoria, bem como de história e filosofia da ciência. Segundo Chibeni, a discussão destes questionamentos

apresenta desdobramentos extremamente variados e complexos, que ocupam a maior parte da literatura em filosofia e fundamentos da física das últimas três décadas, e sua exploração parece ainda em sua fase inicial. (CHIBENI, 1997, p.4)

Ademais, essas discussões não são o foco principal deste trabalho, porém são necessárias para lhe fornecer coerência, já que guiaram a construção do curso que será analisado nesta dissertação. Assim, é preciso advertir que não temos a pretensão de esgotar temas complexos, caros a epistemólogos, filósofos e historiadores da ciência. Entretanto, esperamos que a apresentação deste debate, sobre a natureza da ciência e sua relação com a realidade, beneficie o educador em ciências, que tem a árdua tarefa de trabalhar na interface destas diversas áreas do conhecimento.

2.1 – Um breve relato histórico: das origens da “Velha Mecânica Quântica” (1900-1924) à “Verdadeira Mecânica Quântica” (1925-1927)

Ao apresentar os resultados de seus trabalhos na Sociedade Alemã de Física, em 14 de dezembro de 1900, Max Planck instaurou o germe das transformações que mudariam a Física para sempre (PAIS, 1982). Por meio de uma hipótese que a ele mesmo desgostava, Planck foi capaz de explicar os resultados experimentais do espectro de emissão da radiação do corpo negro.

A principal característica de um corpo negro é a absorção de toda a radiação térmica que incide sobre ele³. Esse poder de absorção representa a quantidade de energia incidente absorvida, sendo que uma fração de energia é reemitida em forma de ondas eletromagnéticas. Qualquer corpo aquecido emite radiação que corresponde a uma determinada cor. Esta coloração é resultante da mistura de radiações eletromagnéticas de diferentes frequências, cada uma com sua própria intensidade. Assim, um pedaço de metal aquecido pode emitir uma luz de cor vermelha, na faixa do visível, e radiação infravermelha invisível ao olho humano. A radiação emitida por um corpo negro pode, então, ser examinada por um espectroscópio para se determinar cada intervalo de frequência que constitui essa mistura, de modo que as proporções das intensidades de cada cor podem ser medidas experimentalmente.

Diversos resultados experimentais estavam disponíveis no final do século XIX, evidenciando como a energia radiante é emitida para diferentes frequências. Esses resultados levaram os físicos (G. Kirchhoff, W. Wien, Lord Rayleigh, J. Stefan, L. Boltzmann, entre outros) a buscar uma lei que regesse a emissividade do corpo negro por meio dos pilares teóricos da física até aquele momento: o eletromagnetismo, a termodinâmica e a mecânica estatística. Contudo, as tentativas teóricas de explicar o comportamento da radiação eram incompatíveis com os resultados experimentais. Essa discordância entre teoria-experimentação constituiu-se em um grave problema para a física do final do século XIX (JAMMER, 1966).

Após inúmeras tentativas frustradas de obter os resultados experimentais conhecidos a partir de manipulações teóricas, Planck percebeu que a radiação do corpo negro dependia apenas da temperatura de suas paredes, e não de sua natureza. Sendo assim, lançou mão de uma hipótese *ad hoc*, considerando que as paredes do corpo negro eram constituídas de osciladores, elementos finitos de energia ε , responsáveis pela emissão da radiação eletromagnética. A partir de conjecturas

³ EISBERG, R. e RESNICK, R. 1986, 4ª ed. p.20

teóricas e manipulações algébricas ele deduz a equação que iria marcá-lo para sempre como o descobridor da lei da radiação⁴:

$$\varepsilon = h\nu$$

O que tornava a hipótese fisicamente problemática era o fato de esses osciladores poderem vibrar apenas com determinados valores de energia⁵. De acordo com as teorias da época, esperava-se que a energia dos osciladores pudesse assumir qualquer valor, considerando-a de forma contínua, de modo que emitissem radiação em qualquer frequência. Entretanto, ainda que incompatível com as teorias vigentes, foi por meio da quantização da energia por ele proposta que se obtiveram previsões teóricas em pleno acordo com os experimentos. Como não havia nada parecido naquele momento, mesmo sendo capaz de reproduzir com precisão os resultados experimentais, sua teoria não obteve tanta repercussão, até ser incorporada pelos trabalhos de Albert Einstein (JAMMER, 1974; PAIS, 1982).

Assim, em 1900, Planck soluciona o problema da radiação do corpo negro do ponto de vista teórico preliminar, mas sua solução teórica completa só foi totalmente encontrada em 1926, com a utilização da estatística quântica. Contudo, *“os resultados de Planck foram, desde o início, uma fonte de inspiração e perplexidade para Einstein”*. (PAIS, 1982, p.440). No artigo publicado em março de 1905, que lhe rendeu o prêmio Nobel, Einstein buscou compreender fisicamente o que Planck havia feito, pois percebia que essa formulação concordava com os dados experimentais, mas não com a teoria. Em seu artigo, ele considera a existência de imperfeições na dedução de Planck e as analisa em detalhes. Desta maneira, ele busca estudar a radiação do corpo negro por um caminho distinto do utilizado por Planck.

Sendo assim, sem utilizar a equação de Planck, Einstein formula a hipótese do quantum de luz a partir da relação entre a entropia da lei de radiação de Wien e o volume de um gás ideal clássico. Segundo Pais, sua dedução

baseia-se numa mistura de física teórica clássica e de um pedaço de informação experimental que desafia a descrição em termos clássicos. A genialidade da hipótese do quantum de luz reside na intuição de escolher o

4 Onde h é a constante que posteriormente viria a ser conhecida como constante de Planck (Planck a chamava de quantum de ação) e ν é a frequência dos osciladores.

5 Ao responder sobre como havia inventado a teoria dos quanta, Planck respondeu: “Foi um ato de puro desespero. Durante seis anos fiquei lutando com a teoria dos corpos negros. Era preciso que eu descobrisse uma explicação teórica a qualquer preço que não fosse a inviolabilidade das duas leis da termodinâmica”. (HERMANN, A. *apud* SEGRÉ, 1982, p. 78).

pedaço correto da informação experimental e os ingredientes teóricos corretos, absolutamente simples. (PAIS, 1982, p.446)

Einstein propôs, com profundas consequências físicas, a idéia de quantização deveria ser estendida também às ondas eletromagnéticas, afirmando que essa quantização é uma propriedade da radiação eletromagnética livre. Ele, então, estende essa propriedade à interação da luz com a matéria. Einstein propõe que a energia eletromagnética se concentra em uma pequeníssima região do espaço. Assim, a energia seria localizada e seu valor era $\varepsilon = h\nu$, sendo h a mesma constante que aparecia no diferente contexto do problema do corpo negro. Deste modo, sendo que “a radiação monocromática se comporta como um meio discreto constituído de quanta de energia” (EINSTEIN apud PAIS, 1982, p. 447) surgia a conjectura do modelo corpuscular para a luz⁶. Considerada pelo próprio Einstein como sua única contribuição revolucionária (PAIS, 1982 p. 445), esta hipótese foi, sem dúvida, sua grande audácia.

Sua proposta foi audaciosa, pois a hipótese do quantum de luz como uma propriedade da radiação eletromagnética livre estava em desacordo com o quadro teórico do eletromagnetismo de Maxwell. Além disso, conforme o eletromagnetismo, a energia eletromagnética dependia do quadrado das amplitudes dos campos, de modo que as frequências não eram relevantes.

Ainda que verse sobre as propriedades da luz, este trabalho de Einstein é sempre lembrado por sua interpretação do efeito fotoelétrico⁷. Ao estender a quantização da radiação à interação da luz com a matéria, Einstein previu a realização de experimentos possíveis de medir alguns parâmetros do efeito fotoelétrico. Caso sua hipótese estivesse correta, seria possível confirmar, por meio dos dados experimentais, as previsões dos resultados por ela fornecidos. O caráter inusitado de suas previsões⁸ é que todas se chocavam frontalmente com as previsões das teorias físicas daquele período. Logo, caso ele estivesse certo, o eletromagnetismo de Maxwell era claramente inadequado, como referencial teórico, para dar conta deste fenômeno.

6 Ainda que Einstein tenha tratado explicitamente os quanta como partículas somente a partir de 1909.

7 Efeito que surgiu nas investigações de um fenômeno descoberto por Hertz em 1887. Ironicamente, durante a realização das experiências que constatarem a existência das ondas eletromagnéticas, apareceu um efeito “secundário”, chamado de efeito fotoelétrico, cuja explicação só seria viável ao se considerar o caráter corpuscular da radiação eletromagnética!

8 Estas previsões eram: a energia cinética dos elétrons não dependeria da intensidade da luz incidente; a existência de uma frequência de corte da luz incidente, de forma que, abaixo desse valor, o efeito não ocorreria, independentemente da intensidade da luz; e que a ejeção dos elétrons seria imediata, não dependendo da intensidade da luz.

A comunidade científica, ainda que a contra gosto, continuou considerando que a quantização proposta por Planck ocorreria apenas nos osciladores eletrônicos que formavam as paredes do corpo negro. Contudo, a energia por ele irradiada seguia as leis do eletromagnetismo, propagando-se como energia eletromagnética livre. Assim

[...] quando Planck introduziu o quantum para descrever as propriedades espectrais da radiação pura, fê-lo por um processo de quantização aplicada à matéria, aos seus osciladores materiais. Ele ignorava que sua proposta implicava a necessidade de rever o próprio campo clássico da radiação. [...] Em contra partida, quando Einstein propôs o quantum de luz, ousou mexer nas equações de Maxwell para campos livres, consideradas, com boas razões, como muito mais bem compreendida. Por conseguinte, pareceu menos repugnante aceitar os devaneios de Planck do que os de Einstein. (PAIS, 1982, p.455).

Esta reação negativa a esse trabalho de Einstein decorre do fato de a concepção ondulatória da luz ter sido corroborada pelo eletromagnetismo clássico. A convicção dos físicos nessa teoria era compartilhada com o próprio Max Planck, que se mostrou despreparado para aceitar o raciocínio de Einstein⁹. Segundo Ford (2004), quando a revolução quântica se firmou, Planck desejou não ter tomado parte dela, não podendo aceitar aquilo que havia iniciado. Logo, por “ousar mexer nas equações de Maxwell”, a hipótese do quantum de luz de Einstein sofreu uma severa e longa resistência.

Pais (1982), afirma que um dos fatores contribuintes para a manutenção da resistência acadêmica à idéia de quantum de luz de Einstein foi a demora da constatação experimental dessas previsões. Uma década se passou até que, por meio de medições extremamente cuidadosas, o físico americano Robert Millikan, em 1914, confirmasse as previsões de Einstein. Além disso, com a detecção, por Arthur Compton, em 1923, de um fenômeno que veio a ser conhecido como efeito Compton teve-se outra importante confirmação da hipótese do quantum de luz.

Esses trabalhos forneceram uma esmagadora evidência da natureza corpuscular da radiação eletromagnética e acenderam as controvérsias acerca da

9 Essa afirmação pode ser evidenciada nas palavras de Planck ao indicar Einstein para a Academia Prussiana de Ciências, em 1913: “[...] podemos dizer que dificilmente haverá um entre os grandes problemas em que a física moderna é tão rica para o qual Einstein não tenha dado uma contribuição notável. O fato de, por vezes, ter errado o alvo em suas especulações, como, por exemplo, em sua hipótese dos quanta de luz, não pode ser esgrimido demais contra ele, pois não é possível introduzir idéias realmente novas, mesmo nas ciências mais exatas, sem algumas vezes correr risco”. (PLANCK apud PAIS, 1982, p.453).

natureza da luz, que desde o final do século XIX pareciam resolvidas. Desta forma, mesmo após a lei do efeito fotoelétrico ter sido aceita, o quantum de luz continuava sendo inaceitável¹⁰. Segundo Pais:

[...] a enorme resistência aos quanta de luz encontrou suas raízes nos paradoxos onda-partícula. A resistência se tornou maior porque a idéia de quantum de luz parecia lançar por terra aquela parte da teoria eletromagnética que se punha mais bem compreendida: a teoria do campo livre. (PAIS, 1982, p.457-458).

Neste contexto, as soluções encontradas para explicar o espectro da radiação do corpo negro, o efeito fotoelétrico e o efeito Compton implicavam desconsiderar a concepção ondulatória da luz, corroborada pelo eletromagnetismo de Maxwell. Este quadro teórico que, apesar de ser incapaz de explicar esses fenômenos, era totalmente bem estabelecido para as explicações como a interferência e a difração da luz. Estava, assim, instaurada a indisposição entre os físicos, visto que era necessária a utilização de duas concepções antagônicas e inconciliáveis para luz, a ondulatória e a corpuscular, para a explicação da totalidade dos fenômenos. Esse mal-estar gerado pela dualidade onda-partícula acompanharia a “Velha Física Quântica” (1900-1924) até à considerada “Verdadeira Mecânica Quântica” (1925-1927). A natureza dual da luz é a raiz de quase todos os problemas filosóficos e epistemológicos relacionados à teoria mais poderosa e bem sucedida inventada pelo homem para a descrição da natureza (ZEILINGER, 1999).

Na fase seguinte da construção da Mecânica Quântica, entra em cena o físico dinamarquês Niels Bohr. Seu trabalho era centrado no desenvolvimento de modelos atômicos, que estavam sendo propostos e estudados desde 1910 com os trabalhos de Ernest Rutherford. Bohr, em 1912, estava aperfeiçoando o modelo “saturniano” desenvolvido por Rutherford (SEGRÈ, 1982). Este modelo planetário, em que o elétron orbitava um núcleo central, possuía severos problemas, principalmente em relação à sua instabilidade eletrônica¹¹. Em 1913, Bohr começa a investigar se seu modelo poderia estar relacionado ao estudo dos espectros.

10 Veja a afirmação feita pelo próprio Millikan em 1913, referindo-se à hipótese do quantum de luz: “Apesar do êxito [...] aparentemente completo da equação de Einstein [para o efeito fotoelétrico], a teoria física de que estava destinada a ser sua expressão simbólica mostrou-se tão insustentável que o próprio Einstein, creio, não a defende mais” (in Pais, 1982, 454).

11 O eletromagnetismo clássico prevê que toda carga acelerada emite energia continuamente. Desta forma, ao mover-se ao redor do núcleo, a perda contínua de energia faria com que o elétron espiralasse até se chocar com o núcleo.

Joahann Jakob Balmer, em 1885, ao estudar as linhas espectrais do hidrogênio, identificou uma regularidade na frequência destas linhas. Ele, então, derivou uma fórmula capaz de fornecer estas frequências, de modo que ela tornou-se fundamental para a criação de qualquer estrutura para o átomo de hidrogênio. Anos após o estabelecimento de sua teoria, Bohr declarou que “*Logo que vi a fórmula de Balmer tudo se tornou claro para mim*”. (BOHR *apud* SEGRÈ, 1982, p.125). Assim, Bohr utiliza em seu modelo atômico a idéia de quantização, iniciada por Planck, na tentativa de encontrar uma estabilidade eletrônica bem como explicar a origem das linhas espectrais do átomo de hidrogênio. Logo, a partir desse estudo, Bohr percebe a necessidade da existência de órbitas privilegiadas (estados estacionários) e a postula, juntamente com três outras hipóteses que contradiziam a física teórica desenvolvida até aquele momento¹².

O desenvolvimento das técnicas experimentais com os raios X (considerados como ondas eletromagnéticas com pequeno comprimento de onda) possibilitou a obtenção de imagens de difração. Iniciou-se a construção de espectrógrafos de raios X, conduzindo à descoberta de linhas espectrais de diversos elementos com uma regularidade desconhecida até então. Estas descobertas estavam diretamente ligadas ao modelo atômico proposto por Bohr, corroborando sua teoria. Seu trabalho fez com que os físicos se debruçassem sobre o estudo das camadas eletrônicas desenvolvendo rapidamente o estudo dos espectros dos elementos químicos.

Por meio de diversas experiências, as previsões teóricas de Bohr foram paulatinamente sendo confirmadas, havendo, por exemplo, a confirmação da existência dos estados estacionários por ele postulados. Entretanto, ainda que bem sucedido experimentalmente, seu modelo não abordava o problema da natureza da radiação eletromagnética, revelando as bases frágeis na qual havia sido construída. A “velha Física Quântica” seria considerada por Jammer como “*um amontoado de hipóteses, princípios e teoremas ao invés de uma teoria logicamente consistente*”.

12 1. Um elétron em um átomo se move em uma órbita circular em torno do núcleo sob influência da atração coulombiana entre o elétron e o núcleo, obedecendo às leis da mecânica clássica.

2. Em vez da infinidade de órbitas que seriam possíveis segundo a mecânica clássica, um elétron só pode se mover em uma órbita na qual seu momento angular orbital L é um múltiplo inteiro de $\hbar$.

3. Apesar de estar constantemente acelerado, um elétron que se move em uma dessas órbitas possíveis não emite radiação eletromagnética. Portanto, sua energia total E permanece constante.

4. É emitida radiação eletromagnética se um elétron, que se move inicialmente sobre uma órbita de energia total E_i , muda seu movimento descontinuamente de forma a se mover em uma órbita total E_f . A frequência da radiação emitida ν é igual à quantidade $(E_i - E_f)$ dividida pela constante de Planck $\hbar$. (EISBERG, R. e RESNICK, R. 1986, 4ª ed. p.138)

Assim, Bohr utilizou em seu modelo as órbitas estacionárias e quantizou o momento angular dos elétrons. Além de explicar a estabilidade do átomo de hidrogênio, Bohr associa as linhas encontradas nas análises espectrais dos elementos químicos a transições descontínuas entre as órbitas, os conhecidos “saltos quânticos”. Com isso, seu modelo conseguiu prever novas séries espectrais além da de Balmer, como, por exemplo, a série de Lyman. Ainda que acompanhado de um grande sucesso experimental, seu modelo só era aplicável para átomos com um elétron. Bohr já sentia que sua teoria possuía sérias imperfeições, sabendo, então, que era de caráter provisório.

Todo o sucesso inicial de seu modelo ocorreu devido ao estudo sobre o hidrogênio, elemento químico mais simples. Cômico deste fato, Bohr passa a estudar os átomos com mais de um elétron, na busca por uma generalização teórica. Contudo, foi Arnold Sommerfeld quem, em 1915, realizou este feito, fazendo uma correção relativística e estendendo a teoria quântica para sistemas com mais de um grau de liberdade, possibilitando, por exemplo, explicar o efeito Zeeman¹³. Mesmo que esta teoria tenha logrado êxito na explicação da periodicidade dos elementos químicos, havia sérios problemas que não podiam ser tratados por qualquer enfoque teórico, como o átomo de hélio, revelando ainda possuir uma fragilidade intrínseca à sua formulação.

Paralelamente ao desenvolvimento dos modelos atômicos, Louis de Broglie se interessou pelo dilema surgido com as proposições de Einstein e Planck. Ciente que diversos resultados experimentais sólidos consolidavam as visões dicotômicas da luz (interferência e difração para o caráter ondulatório e efeitos fotoelétrico e Compton para o caráter corpuscular), ele passa a procurar uma relação simétrica: se ondas se comportam como partículas, partículas talvez se comportem como ondas. A partir de seus questionamentos, e utilizando a Teoria da Relatividade, de Broglie chega à relação fundamental entre o momento (p) de uma partícula e o comprimento de onda (λ) a ela associada:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

¹³ Este efeito foi descoberto em 1896 e mostrava que por meio de um campo magnético externo era possível separar as linhas espectrais do hidrogênio várias componentes. Porém, há casos mais gerais, chamados de “efeito Zeeman anômalo”, que só puderam ser explicados com a Mecânica Quântica, e a introdução do spin do elétron. (EISBERG, R. e RESNICK, R. 1986)

Com isso, em 1924, Louis de Broglie introduz a idéia da “dualidade onda-partícula”, propondo a existência de uma onda fictícia que acompanharia o movimento de qualquer corpo, tornando indissociável a propagação da onda do movimento do corpo (JAMMER, 1966, p.244). Em seu trabalho, ele prevê que os elétrons deveriam exibir propriedades ondulatórias, como a difração, afirmando então que o comportamento dual da radiação também era aplicado à matéria. A confirmação experimental veio em 1927, com a difração obtida pelos físicos Davisson e L. H. Germer, nos laboratórios Bell, e G.P.Thomson, acentuando ainda mais o caráter antiintuitivo da Mecânica Quântica.

Também foi devido às suas deliberações, trabalhando com os princípios da óptica geométrica e ondulatória, que Louis de Broglie obteve um resultado teórico a partir do qual fazia surgir as normas de quantização. Ao trabalhar a relação fundamental que havia derivado, chegou à conclusão de que é preciso a existência de um número inteiro de comprimentos de onda em uma órbita para que existam os estados estacionários propostos por Bohr.

A comunidade científica não deu muita atenção aos trabalhos de de Broglie, até que Einstein demonstrou que havia ficado impressionado, e assim se referiu a este trabalho em uma carta a Hendrik Lorentz:

[...] de Broglie fez uma tentativa interessante para interpretar as regras quânticas de Bohr-Sommerfeld [...]. Creio que é o primeiro raio tênue de luz sobre o pior de nossos enigmas em física. (EINSTEIN *apud* PAIS, 1985, p.518)

Também foi este trabalho que estimulou Erwin Schrödinger a deduzir sua famosa equação de onda para o elétron ao perceber a sua importância para a compreensão da matéria. Estava assim, começando a ser erigida a base matemática sólida e rigorosa que sustentaria a “verdadeira” Mecânica Quântica (SEGRÈ, 1982).

Em 27 de janeiro de 1926, Schrödinger publica nos *Annalen der Physik* (79, 361 – 1926) a equação que receberia seu nome. Seu formalismo era capaz de descrever o comportamento ondulatório de uma partícula e, a partir das condições de contorno impostas à equação de onda, o aspecto discreto surgia naturalmente¹⁴, reproduzindo os resultados de Bohr para as energias do átomo hidrogênio. Para

¹⁴ A equação de Schrödinger tem soluções permitidas para apenas certos valores, chamados de autovalores, ocorrendo a quantização de modo natural. Assim, associado ao modelo atômico, esse formalismo fornece os níveis de energia de modo semelhante às frequências emitidas por um instrumento musical vibratório.

explicar o caráter corpuscular da matéria, Schrödinger introduz a idéia de “pacotes de onda”. (JAMMER, 1966 p.282).

A equação de Schrödinger não possibilita a determinação da trajetória de uma partícula, visto que se trata de uma equação típica dos movimentos ondulatórios. Assim, por ser um formalismo bem conhecido dos físicos matemáticos, sua formulação foi recebida com grande entusiasmo. Entretanto, sua interpretação vai de encontro à concepção macroscópica, causando diversas polêmicas. Era preciso determinar o significado físico da função de onda (ou campo escalar, como chamado por Schrödinger).

Inicialmente, foi considerado que o elétron estivesse espalhado em uma nuvem ao redor do núcleo, de modo que o quadrado do módulo da função de onda seria a sua densidade de carga elétrica. Esta interpretação foi criticada por Bohr, ainda que ele concordasse com sua formulação matemática (SEGRÈ, 1982).

Ainda em 1926, o físico Max Born, ciente das implicações filosóficas envolvidas, propôs uma interpretação diferente daquela proposta por Schrödinger, interpretando o quadrado da função de onda como uma densidade de probabilidade para um elétron ser detectado. O trabalho de Born teve uma recepção conturbada, já que sua visão probabilística colocava em xeque o determinismo e a causalidade. Nas palavras de Born:

Pessoalmente, sinto-me inclinado a renunciar o determinismo no mundo atômico, mas isto é uma questão filosófica, para a qual argumentos físicos isolados não estabelecem padrões. (BORN *apud* PAIS, 1985, p.526)

Vários físicos, entre eles Einstein, não se sentiram capazes de aceitar o abandono da causalidade. A dura contestação de Einstein pode ser ilustrada por uma carta que escreveu a Born, contendo uma das mais conhecidas de suas frases:

A mecânica quântica é muito impressionante. Mas uma voz interior me diz que ainda não é coisa real. A teoria produz um bom resultado, mas dificilmente nos leva para mais perto do segredo do Velho Senhor. Para todos os efeitos, estou convencido que *Ele* não joga dados. (EINSTEIN *apud* PAIS, 1985, p.527).

O trabalho de Schrödinger tornou-se mais sólido após ele mostrar que sua formulação era matematicamente equivalente àquela proposta por outro fundador da Teoria Quântica, Werner Heisenberg.

Em 1922, Heisenberg ficou impressionado com o modelo atômico desenvolvido por Bohr, entretanto se incomodava com alguns recursos utilizados neste modelo como, por exemplo, as órbitas e os raios orbitais, que não são diretamente observáveis. Essa crítica surge de crença de Heisenberg de que uma teoria atômica deveria incorporar somente grandezas possíveis de serem medidas diretamente, como as frequências e intensidades da luz. Assim, a partir de 1923, Heisenberg se esforça para criar uma teoria que rejeitasse as quantidades não-observáveis, julgando que estas deveriam ser desconsideradas pelas teorias científicas. Então, sua formulação deu origem a uma álgebra que fazia uso de grandezas não-comutativas, surpreendendo-lhe inicialmente. Ao reconhecer que a não-comutatividade é relacionada à álgebra matricial, Heisenberg, Max Born e Pascual Jordan desenvolveram um esquema matemático extremamente consistente: a Mecânica Quântica Matricial (SEGRÈ, 1982).

Este trabalho de Heisenberg daria início a mais uma controvérsia no âmbito da Física. Ao enunciar seu conhecido Princípio da Incerteza, ele mostra a impossibilidade do uso de conceitos clássicos quando aplicados aos objetos quânticos. Segundo este princípio, quanto maior for a precisão na determinação experimental de um observável, menor será a precisão na determinação de outro observável (como a posição e momento).

As previsões teóricas de Heisenberg mostraram-se corretas, contudo surgem as controvérsias: por exemplo, não se determina mais a posição de um elétron numa determinada região do espaço, mas apenas a probabilidade de encontrá-lo, abandonando o determinismo. Além disso, surge outro problema pois:

ele supõe que o elétron tem posição e momento simultaneamente bem definidos, só que desconhecidos. [...] ele mostra que há uma impossibilidade de se poder medir com exatidão as duas grandezas conjugadas, e daí conclui que um objeto nunca tem, simultaneamente, valores exatos para as duas grandezas. Esta conclusão passa de uma tese epistemológica (relativa ao conhecimento: “não posso conhecer”) para uma tese ontológica (relativa ao ser, à essência das coisas: “não é”), [...] só aquilo que é observado tem realidade. (PESSOA JR, 2003, p.78).

Agora o observador passa a ter um papel fundamental na determinação da natureza dos objetos quânticos, transformando a exigência clássica que separa o sujeito do objeto, conduzindo, ainda hoje, a calorosos debates.

Ao final do ano de 1926, Bohr e Heisenberg se aprofundaram na questão da interpretação da Mecânica Quântica. Bohr desenvolveu sua interpretação e a apresentou publicamente, em 1927, num congresso em homenagem ao centenário da morte de Alessandro Volta, realizado em Como, na Itália. Ele formulou seu conhecido Princípio da Complementaridade, em que os modelos ondulatório e corpuscular são excludentes, porém complementares para que se possa ter uma descrição completa da realidade. Após essa “apresentação oficial” da Complementaridade, muito dos fundadores da Mecânica Quântica reuniram-se no Instituto de Física de Bohr, em Copenhague, para desenvolverem a teoria quântica. Assim, nasce o “espírito de Copenhague” (SEGRÈ, 1982, p.173).

A teoria elaborada entre 1925 e 1927 carecia de uma interpretação racional, dada a sua distância conceitual em relação à física clássica. O núcleo desta interpretação foi elaborado principalmente por Niels Bohr, em intensa interação com W. Heisenberg e W. Pauli, dentre outros, e recebe hoje variadas denominações, a exemplo de interpretação da complementaridade, de Copenhague, usual e ortodoxa. Naturalmente muitas dessas denominações já refletem em si mesmas as diversas posições que surgiram na comunidade científica face à interpretação da teoria quântica. (FREIRE JR, 1999, p.15)

De modo geral, a interpretação de Copenhague não se preocupa em revelar os processos envolvidos nos fenômenos físicos, abolindo com isso as noções clássicas de causalidade, determinismo, localidade, rejeitando a idéia de uma realidade objetiva, independente do observador. Aproximando-se de uma visão positivista e instrumentalista da ciência, a Mecânica Quântica passa a se importar simplesmente com a capacidade de previsão de resultados experimentais, tornando-se unicamente uma formulação capaz de, matematicamente, explicar e descrever os fenômenos. Contudo,

o que continua sendo controverso é a interpretação dos símbolos físicos e, em particular, a interpretação das fórmulas da física teórica: serão elas sentenças de objeto físico ou então sentenças de objeto mental, ou, talvez, sentenças físico-mentais ou, finalmente, em parte sentenças de objeto mental e em parte objeto físico? (BUNGE, 2000, p.84)

Ainda que tenha sido largamente aceita pela comunidade científica e com grande sucesso experimental, físicos de peso como Einstein, Schrödinger e de Broglie não a aceitaram, passando a questionar duramente a interpretação ortodoxa, pois não concordavam com a rejeição dos conceitos clássicos, nem com a forma de representação da realidade fornecida por esta teoria. Assim, desde o seu surgimento, apresentam-se severas críticas quanto à carência de um significado físico para a Mecânica Quântica. Para estes físicos, era preciso a obtenção de uma teoria atômica completa para que, ao se aprofundar nos problemas surgidos com a interpretação da dualidade onda-partícula, fosse possível compreender a constituição da natureza, da realidade, pois

De acordo com uma possível interpretação da complementaridade, não se trata apenas de uma questão epistemológica, o comportamento dual observado na natureza é ontológico. (FAGUNDES, 1997, p.51)

A Mecânica Quântica descreve a realidade como subjetiva, no sentido da dependência do observador (BUNGE, 2000). Segundo Pessoa Jr, tem-se um interessante problema ao se considerar uma afirmação feita pelo físico John Wheller, que injetou uma dose de ontologia na interpretação da complementaridade:

Apenas quando o “observador participante” decide se o fenômeno será corpuscular ou ondulatório é que a realidade passada adquire uma existência “atualizada”; antes disso é como se o passado não existisse! (in PESSOA JR, 2003, p.21)

Para Popper (1982), a existência destes problemas na Mecânica Quântica instaurou uma crise a partir da segunda metade do século XX, chamada por ele de o “cisma da física”. Esta teoria foi duramente combatida por diversos físicos proeminentes, surgindo acirradas discussões acerca do significado físico do formalismo quântico. Os celebres debates entre Einstein e Bohr talvez sejam o que melhor ilustra essas divergências, ficando gravados para sempre na história da Física.

Einstein, como realista, não gostava de ter que abandonar o determinismo e a causalidade. Assim, em 1935, juntamente com os físicos Boris Podolsky e Nathan Rosen, Einstein elabora o conhecido paradoxo de EPR, chamado por Beauregard de “O terceiro temporal do século XX” (BEAUREGARD, 1982), na tentativa de mostrar a incompletude da Mecânica Quântica na descrição de um fenômeno físico. Apoiados na relatividade, que descarta a transmissão instantânea de informação, eles mostram que a teoria quântica esta correta, mas não é completa pois é incapaz de representar

todos os elementos da realidade física¹⁵. Este trabalho originou intensas discussões sobre a possibilidade de se construir uma teoria quântica do tipo realista, isto é, uma teoria que além de ser capaz de fazer as mesmas previsões experimentais, fosse determinista e local. Os argumentos foram articulados de tal forma que, segundo Chibeni

a cogência desses argumentos para a incompletude da Mecânica Quântica forçou os adversários a buscar refúgio em inesperadas e, não raro, bizarras posições físicas e filosóficas. (CHIBENI, 1997, p.5)

O argumento de EPR atesta que para a Mecânica Quântica ser considerada completa é preciso admitir que há na realidade objetiva grandezas físicas sem valor definido. Estes valores, de um determinado objeto, podem ser afetados ao se agir sobre outro objeto, distante espacialmente e desconectado do primeiro, como uma espécie de ação à distância. (CHIBENI, 1997).

Bohr respondeu essas críticas escrevendo um artigo desqualificando os argumentos de EPR, criticando o ideal realista da Física Clássica, fazendo uso de argumentos filosóficos que alteram a concepção de realidade. Ele utiliza pela primeira vez a expressão *fenômeno quântico* ao afirmar que o contexto da experiência influencia na definição da realidade física. (FREIRE JR., 1999). Bohr, assim, constrói sua defesa por meio de um posicionamento filosófico que evoca relações entre o sujeito e o objeto.

Chibeni afirma que é enganoso tratar Bohr como vencedor, fazendo com que a comunidade de físicos se aglutinasse em torno da interpretação desenvolvida sob sua liderança, principalmente pelo fato do próprio Bohr não ter constituído um conjunto homogêneo ou mesmo consistente de teses. Assim, a ausência de uma sistematização das idéias de Bohr sobre a interpretação da Complementaridade abriu margem para diversas re-leituras, fornecendo interpretações diversas daquela por ele criada¹⁶. Ainda que não se possa determinar precisamente a posição de Bohr como anti-realista¹⁷, as interpretações oriundas da interpretação de Copenhague trazem essa marca. Mesmo divergentes em muitos pontos, segundo Chibeni, “*No entanto, um*

15 Para um estudo detalhado do paradoxo de EPR e suas implicações para a física ver EINSTEIN, PODOLSKY e ROSEN, 1935; BOHM e AHARONOV, 1957; ASPECT, GRANGIER e ROGER, 1981; BROWN, 1981; BEAUREGARD, 1982; CHIBENI, 1997; FREIRE JR., 1999.

16 Há um número extenso de obras que tratam deste tema. Entretanto, os educadores interessados podem encontrar uma discussão aprofundada sobre a interpretação da Complementaridade e suas implicações para o ensino da física em FAGUNDES, 1997.

17 Comumente encontra-se na literatura que o debate Einstein- Bohr era um debate entre realistas contra anti-realistas. Esta tese, no entanto, é questionada por POPPER, 1982; FOLSE, 1985; FREIRE JR, 1999.

ponto comum parece existir: a sedução por uma forma ou outra de anti-realismo". (CHIBENI, 1997, p.5).

Ainda que possa ser contestada, uma extensa adoção da interpretação de Copenhagen não pode ser negada. Com sérias controvérsias e mesmo tendo Einstein como principal opositor, a teoria probabilística plasmada no quadro conceitual da interpretação de Copenhagen prevaleceu, tornando-a, a partir da década de 30, quase consensual.

Contudo, esse consenso foi abalado, na década de 50, com o físico David Bohm. Ele afirmou em seus trabalhos a possibilidade de completar a Mecânica Quântica, transformando-a em uma teoria causal, portanto determinista e realista. A idéia era a inserção de "variáveis ocultas" no formalismo quântico, tornando-a completa. Além disso, sua teoria era capaz de reproduzir os mesmos resultados e previsões experimentais da teoria ortodoxa não relativística, gerando assim debates epistemológicos centrados na questão do determinismo.

Segundo Freire Jr., Bohm *"combinou, em uma interpretação própria, a interpretação da complementaridade de Niels Bohr, com uma ontologia realista."* (FREIRE JR., 1999, p.48). Entretanto, o mundo bohmiano seria não-local, revelando a necessidade de se repensar a realidade.

O trabalho de Bohm foi apresentado à comunidade científica num momento em que a interpretação da complementaridade era considerada uma teoria completa. Com isso, mesmo os físicos admitindo que a teoria de Bohm fosse consistente, houve pouca adesão a essa nova interpretação da Mecânica Quântica¹⁸ (FREIRE JR. 1999).

A existência de uma teoria capaz de prever os mesmos resultados da interpretação da complementaridade, porém utilizando uma interpretação determinística, reacendeu os ânimos, iniciando debates sobre os fundamentos da Mecânica Quântica. Motivado pelo trabalho de Bohm, o físico John Bell, em 1964, realizou um trabalho que viria a contribuir profundamente para o entendimento do mundo microscópico.

Bell transforma em um critério matemático e físico a noção de localidade. Ele, então, formula um modelo de uma descrição completa para a Mecânica Quântica

¹⁸ É preciso considerar que nesta época havia uma "prova" matemática, fornecida por John von Neuman, da impossibilidade de construção de teorias que utilizassem outras variáveis além daquelas utilizadas pela teoria quântica usual. Para uma rica discussão sobre os trabalhos de Bohm e as variáveis ocultas ver FREIRE JR. 1999 e CHIBENI, 1997.

utilizando as variáveis escondidas. Por meio de manipulações matemáticas ele deriva as conhecidas “desigualdades de Bell”, que não poderiam ser verificadas pela interpretação ortodoxa. Bell mostra que qualquer teoria realista que produzisse os resultados experimentais esperados pela teoria quântica deveria ser, necessariamente, não-local. Isto significa que se a Mecânica Quântica quiser descrever completamente a realidade será preciso que se viole o princípio da localidade.

Seu trabalho causou furor na comunidade científica, visto que agora as questões que fomentaram as discussões de Einstein e Bohr poderiam ser submetidas a testes experimentais. Surge assim o desafio de confirmar experimentalmente se as teorias que utilizam as variáveis ocultas apresentavam a não-localidade, confrontando a teoria de Bohr com teorias realistas que respeitavam o critério de localidade. Desta maneira ele leva a localidade para o “*tribunal da experiência*” (FREIRE JR., 1999) possibilitando, pela primeira vez a confrontação das previsões quânticas com as previsões das teorias alternativas (realistas e locais).

A partir da década de 60 começa a busca pelos resultados experimentais que violassem as desigualdades de Bell. Alan Aspect, em 1980, realizou alguns experimentos cujos resultados parecem confirmar que as desigualdades de Bell podem ser violadas, ao contrário do que afirmam as teorias realistas locais. Ainda hoje, testes cada vez mais sofisticados continuam sendo realizados na tentativa de compreender o que de fato ocorre no mundo microscópico. Contudo, nada ainda pode ser tirado de conclusivo. A dificuldade experimental é extrema, levando à contestação dos resultados obtidos, de modo que ainda não houve um experimento capaz de fornecer uma resposta cabal.

Esta breve apresentação indica o quanto a Mecânica Quântica nos obriga a repensar o que é a realidade, revelando os limites e capacidades do intelecto humano na compreensão mais profunda da realidade. A dualidade onda-partícula, o conceito de função de onda e redução de estado, o princípio da incerteza de Heisenberg, a não-localidade etc. são construções da teoria quântica que impõem um outro tipo de realidade física, distante da razão clássica e do senso comum. A compreensão dessas nuances obriga compreender, antes, como se obtém acesso a essa realidade.

Ainda que matematicamente a teoria quântica esteja solidamente formulada, existe um problema, agora filosófico e epistemológico: como interpretar este formalismo matemático? Deste modo, qual é o estatuto ontológico dos objetos

quânticos descritos pelo formalismo da Mecânica Quântica? É possível falar na ontologia de fótons, elétrons, quarks, neutrinos? Estas entidades existem ou serão construtos teóricos? Qual é a noção de realidade que se pode conceber, já que ela própria é criada somente no instante da medida? Além disso, como conceber a existência de coisas macroscópicas, ontologicamente objetivas, visto que são constituídos por estes objetos quânticos que têm sua existência dependente da observação? Nas palavras de Bunge:

Na verdade, se cada átomo do meu corpo existe apenas na medida em que eu posso observá-lo, então eu – um sistema de átomos – não existo, senão por outro motivo pelos menos porque tenho outras coisas a fazer além de ficar observando incessantemente meus constituintes microfísicos. (BUNGE, 2000, p.212)

É preciso assim, ao se tentar fornecer uma dimensão ontológica aos construtos teóricos da Mecânica Quântica, aprofundar as reflexões acerca da realidade, já que a imagem da natureza fornecida por esta teoria difere por completo de tudo o que se havia construído até então pelas teorias clássicas. Estas reflexões revelam a necessidade de um exame cuidadoso acerca de como a ciência apreende essa realidade. Com isso, é indispensável que se faça o seguinte questionamento:

Estaríamos então obrigados a rever nossas expectativas intelectuais em relação à ciência, esperando apenas que ela nos forneça ficções úteis ou instrumentais adequados e confiáveis para exclusivamente manipular ou prever o comportamento do mundo, sem nunca nos assegurar nada sobre a sua real estrutura ou as leis que de fato regulam seu funcionamento? (BARRA, 1998, p.15).

Assim, os problemas dos fundamentos da Mecânica Quântica possibilitam que se leve para a sala de aula, de maneira ímpar, a possibilidade de se “discutir quais as razões pelas quais se decide atribuir realidade a determinadas afirmações científicas” (MATTHEWS, 1994).

2.2 – Interpretações

Por meio do relato histórico apresentado, foi possível perceber que as questões originárias dos debates acerca dos fundamentos da Mecânica Quântica apareceram desde sua criação e estabelecimento como a teoria científica mais bem sucedida para desvendar o mundo microscópico. Os fundamentos desta teoria mostraram, e ainda mostram, uma profunda ruptura com concepções clássicas, originando posições epistemológicas e filosóficas divergentes. Seu formalismo possibilitou o surgimento de diversas interpretações que incendiaram ainda mais esse cenário.

Não obstante a existência destas dissonâncias, a interpretação de Copenhague é a que impera na imensa maioria dos cursos superiores de Física, bem como nos livros textos de Mecânica Quântica. O princípio da complementaridade de Bohr, o princípio de incerteza de Heisenberg, a interpretação probabilística da função de onda por Born formam as bases desta interpretação.

A validade de concepções gerais e fundamentais da Física Clássica, como existência de uma realidade independente do observador; a natureza determinística da descrição dos fenômenos por meio de leis causais; o princípio da localidade, que afirma a impossibilidade de transmissão instantânea de informação; bem como a possibilidade de fornecer uma descrição completa para os fenômenos que estuda foram questionadas, trazendo severas implicações para a maneira de compreender a realidade física. A interpretação ortodoxa nega quase todas essas características, visto que *“é uma teoria não-realista, não-determinista, não-objetiva, não-local, mas completa”* (JAMMER, 1974).

A dualidade onda-partícula encontra-se, implícita ou explicitamente, na raiz da maioria dessas discussões devido à impossibilidade de construção de representações clássicas para os objetos do mundo microscópico. Desta forma, qualquer teoria quântica realista possui inúmeros problemas que desaparecem do ponto de vista da interpretação da Complementaridade que, por sua vez, gera outros inúmeros problemas.

A dualidade é representada por meio do formalismo da Mecânica Quântica como uma superposição de estados, sem equivalente na visão clássica, ocasionando

uma série de problemas. Um dos mais importantes é o problema da medição¹⁹ ou o “colapso da função de onda”, gerador de profundos debates de cunho epistemológico.

Em suma, a interpretação de Copenhague fornece uma imagem da realidade que alimenta uma torrente de polêmicos questionamentos sobre a natureza da matéria, bem como sobre os fundamentos do conhecimento científico. Mais uma vez, é imprescindível ressaltar que mesmo com todas essas questões, até hoje sem uma solução cabal, o formalismo da Mecânica Quântica (ainda que esteja limitado a domínios não-relativísticos) nunca foi colocado em discussão por nenhuma dessas divergências. Todo o embate se dá em torno das possíveis interpretações do mesmo.

Apesar de todos esses problemas, a Mecânica Quântica mostrou-se correta, tornando-se a teoria fundamental da estrutura da matéria (CHIBENI, 1997). Sua aplicabilidade revolucionou a tecnologia. Como teoria científica, permite que se investigue dos átomos ao Big Bang, passando pela genética molecular, revelando sua abrangência. E todo esse sucesso calcado em uma visão de ciência que, na maioria das vezes, progrediu preocupada apenas com a descrição da realidade. Esta afirmação pode ser ilustrada na fala do célebre físico, Richard Feynman, ganhador do prêmio Nobel por seus trabalhos no desenvolvimento da Mecânica Quântica:

Penso que se pode afirmar, com segurança, que ninguém entende a Mecânica Quântica. Caso consiga evitar, não fique se perguntando “mas como pode ser assim?” porque isso será perda de tempo e o levará a penetrar num beco escuro, de onde ninguém até hoje conseguiu escapar. Ninguém sabe como ela pode ser assim. (FEYNMAN *apud* HERBERT, 1985, p.11)

Entretanto, ainda que a ciência avance sem necessariamente buscar ir além da descrição e predição, acreditamos que o ato de ensinar ciência necessita que se enfrente o desafio de colocar-se entre o físico e o filósofo, levando esses questionamentos para a sala de aula.

Assim, a partir desse pano de fundo, apresentaremos algumas das principais interpretações da Mecânica Quântica, que motivaram e guiaram a confecção do curso apresentado e analisado nesta dissertação.

¹⁹ Discussões mais profundas sobre o problema da medição, colapso de onda e o postulado da projeção podem ser encontradas em PESSOA JR, 2000, 1992; BROWN, 1986; FINE, 1970,

2.3 – Quatro interpretações da Mecânica Quântica

Do que se trata o formalismo quântico? Ou seja, a que se referem seus símbolos e equações? Estas perguntas possuem diferentes respostas, dependendo do ponto de vista tomado. Talvez aqui resida sua maior importância para o ensino: de maneira geral, a Mecânica Quântica é passível de ser interpretada de diferentes modos. É preciso destacar que cada uma dessas interpretações é coerente, autocontida e em acordo com os mais variados experimentos quânticos. Segundo Montenegro e Pessoa Jr.

Existem dezenas de interpretações diferentes da Teoria Quântica, que podem ser agrupadas em quatro grandes grupos, conforme sua ontologia e atitude epistemológica. (MONTENEGRO e PESSOA JR, 2002, p.3).

Em um trabalho realizado para identificar as “interpretações privadas” desenvolvidas pelos alunos em um curso de Mecânica Quântica na graduação, isto é, quais as representações elaboradas pelos alunos durante a aprendizagem dos conceitos quânticos, Montenegro e Pessoa Jr. apresentam quatro grupos interpretativos desta teoria:

Com relação à ontologia, uma interpretação pode conceber um objeto quântico de maneira corpuscular, ondulatória ou dualista. Quanto às atitudes epistemológicas, as duas básicas são realismo e positivismo. Com estas categorias, encontramos quatro grandes grupos interpretativos. Dentro de cada uma delas, mencionaremos uma versão “ingênua”, que pode ser apresentada com proveito em sala de aula. (MONTENEGRO e PESSOA JR, 2002, p.3)

Ainda que seja voltada para o Ensino Superior, acatamos a sugestão de que seria proveitoso utilizar em sala de aula as quatro interpretações apresentadas por esses autores. Com isso, baseamo-nos trabalhos de Pessoa Jr (2003) para discutir com os alunos do Ensino Médio estas possíveis interpretações da Mecânica Quântica no curso que elaboramos e que será analisado posteriormente nesta dissertação.

Detalharemos agora as quatro interpretações selecionadas por Pessoa Jr.

1 – Interpretação Ondulatória: Esta interpretação considera que os objetos quânticos possuem uma ontologia ondulatória. Um objeto quântico, antes de ser detectado, é espalhado, propagando-se como uma onda. Contudo, no momento da detecção, esta onda ficaria localizada tornando-se um estreito pacote de onda, como se fosse uma partícula. Surge, assim, a necessidade de inserção da idéia de “colapso da função de

onda” ou “redução do vetor de estado”. Isso decorre do fato de um estado $|\Psi\rangle$ poder ser escrito como a superposição de dois auto-estados $|\psi\rangle = a_1|\psi_1\rangle + a_2|\psi_2\rangle$. Após a medição, o estado é reduzido ou para $|\psi_1\rangle$ ou para $|\psi_2\rangle$. O “colapso” aparece, pois ao se detectar, por exemplo, $|\psi_1\rangle$, a probabilidade de detecção de $|\psi_2\rangle$ se anula instantaneamente. Com isso, surge a não-localidade, com a propagação de informação com velocidade infinita, dado que a onda é considerada como real.

2 – Interpretação Corpuscular: Esta interpretação atribui uma ontologia corpuscular aos objetos quânticos, sem a necessidade de estar a eles associada qualquer propriedade ondulatória. Com isso, esta abordagem possui extrema dificuldade em dar conta dos fenômenos ondulatórios como, por exemplo, os padrões de interferência e difração do experimento da dupla fenda. Uma saída proposta para explicar esses padrões argumenta que o objeto quântico sofreria impulsos discretos ao interagir com o anteparo gerando o padrão de interferência. Outra solução proposta é a utilização de uma Lógica Quântica, ou não-clássica. A abordagem corpuscular apresenta, ainda, uma outra visão, chamada de “interpretação dos coletivos estatísticos”, na qual um vetor de estado representa a média sobre todas as posições possíveis para a partícula. Assim, como o vetor de estado não pode descrever um objeto quântico individual, esta visão considera a Mecânica Quântica como essencialmente estatística, não fornecendo uma descrição completa da natureza.

3 – Interpretação Dualista Realista: Esta interpretação atribui uma ontologia dual para o objeto quântico, ou seja, o concebe constituído de duas partes: uma partícula e uma onda a ela associada. A detecção da partícula depende da amplitude de sua onda associada. Assim, na região onde houver uma superposição destrutiva, a probabilidade de se encontrar ali a partícula é pequena, chegando a ser nula quando houver um cancelamento total. Um sério problema surge com a “parte não detectada”, ou seja, ainda que a partícula seja detectada, uma parte de sua onda piloto, com menor amplitude, nunca é detectada. Com isso, foi proposta a existência de um tipo de onda que não carrega energia, denominada “onda vazia”. Esta interpretação considera a existência de “variáveis ocultas”, que seriam partículas, com velocidades e posições bem definidas, porém guiadas pelas “ondas-piloto”.

4 – Interpretação da Complementaridade: Esta interpretação destaca uma limitação da capacidade de se poder representar a realidade quântica por meio de conceitos da Física Clássica, ainda que estes tenham que ser usados para interpretar os resultados

experimentais. Os objetos quânticos podem ser corpusculares ou ondulatórios, mas nunca os dois ao mesmo tempo. Esta interpretação não atribui qualquer ontologia a estes objetos até que eles sejam observados. Assim, só se pode atribuir a eles uma realidade após o ato da medição. O estado $|\Psi\rangle$ também é destituído de qualquer status ontológico, sendo considerado apenas como um instrumento matemático de predição e cálculo. Como o objeto quântico pode ser ondulatório surge, inicialmente, a questão do colapso da onda, visto que esta é detectada pontualmente. Contudo, este problema é solucionado ao se adotar o “postulado quântico”, proposto por Planck, e considerado por Bohr como o princípio fundamental da teoria quântica. Este postulado afirma que toda detecção é necessariamente pontual, isto é, há uma descontinuidade intrínseca a qualquer processo atômico.

Por meio destas interpretações, é possível discutir os fundamentos epistemológicos e ontológicos dos objetos quânticos, buscando evidenciar e refletir como se dá o processo de construção científica.

Sua utilização revela como é necessário que se procure entender quais os vínculos existentes entre o conhecimento científico e o mundo. Além disso, elas podem servir de auxílio para que a ciência não seja apresentada ou concebida como uma obra terminada, revelando o caráter dinâmico da verdade, ao se perceber a disputa entre os modelos e como se validam as teorias. Para Fagundes:

Esse caráter dinâmico da verdade, e conseqüentemente da realidade vinculada a ela, e a complexidade desse assunto estão intimamente relacionados à construção do conhecimento científico e às imagens da realidade determinadas por esse conhecimento e portanto é de se espantar que essas discussões raramente estejam presentes no ensino de ciências. Afinal a realidade sensível sustentada pelas correntes empiristas nas percepções sensoriais, que em geral está presente nos projetos de ensino de física, certamente difere da realidade inteligível sustentada pelos mais racionalistas e realistas que, por sua vez, difere da realidade imediata do senso comum. (FAGUNDES, 1997, p.9)

Certamente que não será possível adentrarmos nos problemas filosóficos envolvidos na determinação da realidade e sua conexão com o conhecimento científico levantados por essas interpretações, visto que ultrapassaria o espaço desta dissertação. Desejamos apenas apresentar as questões que originaram esse trabalho e que estavam presente no processo de criação do curso por nós elaborado.

Inicialmente, tentamos evidenciar como a física apreende a realidade, rompendo com a concepção clássica do mundo e que esta ruptura pode ter sérias implicações para o Ensino de Ciências. A partir de tais discussões, pretendemos revelar aos alunos a complexidade das relações entre teoria e realidade, evidenciando o papel da imaginação e da razão nas construções científicas, bem como suas controvérsias, na tentativa de construir um caminho que possa mostrar “como” inserir elementos de Física Quântica no Ensino Médio.

No ensino, nosso alvo é o crepúsculo, pois é quando a razão e a imaginação se complementam. Ou o amanhecer, quando é a vez da imaginação e da razão se complementarem. E é nesse lapso que surgem as imagens da realidade. (FAGUNDES, 1997, p. 12)

2.4 – A realidade

O termo “realidade” encerra em si mesmo uma complexidade infundável. Sua polissemia não permite que seu significado seja inequívoco, acalutando profundos debates filosóficos e epistemológicos. As discussões tornam-se mais produtivas para o contexto escolar quando se trata de compreender as relações entre as teorias científicas e o mundo vinculado a elas.

Como será exposto, este debate é polarizado em duas posições filosóficas opostas: os realistas e anti-realistas. Ainda que haja uma série de posicionamentos intermediários, a discussão é centrada na existência, ou não, de certas classes de objetos (objetos matemáticos, os universais, os objetos materiais ordinários, as entidades não-observáveis postuladas pela ciência etc.), independentemente de qualquer cognição (CHIBENI, 1997).

Ainda que este debate seja usualmente travado no âmbito das filosofias, parece importante enfrentar o desafio de procurar entender suas implicações para o Ensino da Física. Isso decorre do fato de ser preciso considerar que o cidadão não-especialista pouco se importa com a polêmica sobre o conhecimento e, principalmente, faz poucas reflexões sobre como a ciência representa uma realidade exterior. Além do mais, para estas pessoas a realidade é algo dado, oferecido aos sentidos humanos. Assim, basta que se capte e registre aquilo que a realidade lhes apresenta, não sendo necessárias interrogações mais profundas.

Berger e Luckmann (1973) desenvolveram um tratado teórico sistemático de sociologia do conhecimento, intitulado *A construção social da realidade*. Neste trabalho, eles atestam esta forma de pensar (ou não pensar!) sobre a realidade, ao revelarem que

O homem da rua habitualmente não se preocupa com o que é “real” para ele e com o que “conhece”, a não ser que esbarre com alguma espécie de problema. Dá como certa sua “realidade” e seu “conhecimento”. (BERGER e LUCKMANN, 1973, p.12).

Estes autores destacam como as pessoas comuns, não especialistas, acessam a realidade, definindo-a como “*qualidade pertencente a fenômenos que reconhecemos terem um ser independente de nossa própria volição (não podemos ‘desejar que não existam’)*”. Além disso, eles definem conhecimento “*como a certeza de que os fenômenos são reais e possuem características específicas*”. (BERGER e LUCKMANN, 1973, p.11).

Logo ao nascer, um indivíduo passa a se relacionar com um mundo “pronto”, dado, situado no espaço e no tempo, e imerso em uma sociedade organizada, com suas regras e códigos. Esta mesma sociedade lhe transmite, por meio da linguagem, os objetos por ela conceituados, de modo que esta pessoa interage com coisas que reconhece como reais. Assim,

Apreendo a realidade da vida diária como uma realidade ordenada. Seus fenômenos acham-se previamente dispostos em padrões que parecem ser independentes da apreensão que tenho deles e que se impõem à minha apreensão. A realidade da vida cotidiana aparece já objetivada, isto é, constituída por uma ordem de objetos que foram designados como objetos antes de minha entrada na cena. A linguagem usada na vida cotidiana fornece-me continuamente as necessárias objetivações e determina a ordem em que estas adquirem sentido e na qual a vida cotidiana ganha significado para mim. (BERGER e LUCKMANN, 1973, p.39).

Logo, a vida cotidiana forja as “evidências” que transformam aquilo que se vive em algo real, ratificando a noção de que o mundo em que se habita detém a verdadeira “realidade”. Além disso, o uso corriqueiro do termo “realidade”, presente nos mais variados contextos possíveis, faz parecer que seu significado careça de reflexão. A familiaridade surgida no uso contínuo da palavra faz com que seu conceito seja tomado sempre como algo claro, de modo que qualquer questionamento deve ser descartado. Ou seja, “as coisas são o que realmente são”, “realidade é aquilo que o mundo é” e pronto! Para o “*homem da rua*” (BERGER e LUCKMANN, 1973), ir além disso é desnecessário, coisa para filósofo...

Entretanto, ainda que a atitude espontânea do cidadão comum prescindia da necessidade de reflexão sobre a realidade, visto que considera as coisas pertencentes ao mundo vivido como reais, deve-se ressaltar que “*Estas são algumas das mais antigas perguntas não somente da pesquisa filosófica propriamente dita mas do pensamento humano como tal*”. (BERGER e LUCKMANN, 1973, p.12).

Deveria ser natural ao educador se apropriar de tão antigo campo de interrogação para exercitar a reflexão crítica do que se percebe e se esconde por trás das aparências. Reside aqui a problemática de ser e de parecer, dos entes do mundo e de suas representações. Os filósofos sempre se interessaram em responder perguntas relacionadas à correspondência entre as representações sobre a realidade e a própria realidade, e esse pode ser também um bom tema educacional.

Fogel (2003) ao ter em mãos uma laranja, apesar de parecer supérfluo, argumenta que não é trivial responder “o que é uma laranja”. Com isso, revela os diversos significados que ela assume: é um fruto *citrus sinensis* para um agrônomo; é

a subsistência para quem a cultiva e transporta; é uma bola de futebol para dois garotos; uma “natureza morta” quando na tela de Cézanne; é simplesmente a “cor laranja” para quem admira o crepúsculo ou “sujeira” para o varredor de rua. O autor, então, se mostra surpreso com o fato *“de que a laranja, na verdade, não é tão tranquilamente laranja. [...] constata-se que há muitas laranjas... e eu volto a perguntar: o que é realmente a laranja?”* (FOGEL, 2003, p.20).

Com isso, pode-se notar a existência de formas distintas de conhecer, perceber e apreender o mesmo objeto, evidenciando que o mundo se revela de maneira diferente sempre que se muda a perspectiva que se tem sobre ele. O homem pode, então, *“perceber-se no mundo e, apesar de imerso nele, [passa] a refletir sobre si e sobre o mundo”*. (PINHEIRO, 2003, p.22). Com isso a

Capacidade humana possibilitou a construção de conhecimentos complexos e abstratos que vão muito além da realidade cotidiana e imediata. Tais conhecimentos ampliaram os limites do mundo e propiciaram a reflexão a respeito de até onde eles se referem a uma realidade existente fora do homem. (PINHEIRO, 2003, p.22).

O homem passa a construir teorias que sejam passíveis de descrever, explicar e compreender a realidade. Este empreendimento humano trouxe questionamentos sobre como se dá a produção do conhecimento e como ele se relaciona com a realidade que pretende perscrutar. Estas perguntas fomentaram debates filosóficos profundos e extensos, conduzindo os filósofos a se questionarem sobre a existência de uma realidade externa, independente do ser que a investiga e, posteriormente, desejaram saber a possibilidade de essas teorias corresponderem a essa realidade exterior.

2.5 – O Realismo e o Anti-Realismo

A existência ou não de uma realidade independente e a possibilidade ou impossibilidade de acessá-la deram origem a um debate que se encontra longe do final. Duas posições filosóficas antagônicas, o realismo e o anti-realismo, se enfrentam na tentativa de compreender e revelar as relações entre o conhecimento humano e a realidade ao qual ele se refere.

Ao longo do tempo, o significado do termo realismo foi se transformando, adequando-se às correntes de pensamento que buscavam estudá-lo, sempre havendo posições dicotômicas. Para Chibeni, “*poucos conceitos filosóficos têm recebido caracterização tão diversas quanto o do realismo*” (CHIBENI, 1997, p.11). Na Idade Média, a escolástica, pensamento cristão associado ao platonismo, originou a tese que definia o realismo como uma doutrina metafísica, baseada na existência dos “universais”, entes abstratos, que possuíam sua existência anterior às coisas reconhecidas como reais devido ao contato direto (REALE e ANTISERI, 2004). A doutrina medieval opositora era o nominalismo, que afirmava o caráter meramente abstrato dos universais, tidos por seus defensores como entidades lingüísticas, simplesmente nomes, sem existência autônoma (REALE e ANTISERI, 2004).

Com o obscurantismo existente no final do século XVI, o posicionamento filosófico que impera é o *ceticismo*, doutrina defensora da tese que duvida da capacidade da razão humana de conhecer a realidade exterior e o próprio homem. A forma encontrada para combater o ceticismo foi a formulação de perguntas sobre como a razão pode conhecer a matéria, como o intelecto pode se conhecer e conhecer aquilo que é diferente dele (REALE e ANTISERI, 2004). Surgem, assim, no início do século XVII, as versões dicotômicas modernas de realismo e anti-realismo. O desenvolvimento dessas visões origina um largo espectro de posicionamentos filosóficos entre os dois extremos.

De maneira geral, a visão realista considera o realismo metafísico, baseado na existência de uma realidade independente, exterior à mente humana e à sua cognição. Assim, apesar de o ser humano criar representações mentais e lingüísticas sobre essa realidade, ao se eliminar o sujeito e a consciência, esta realidade autônoma continuará existindo.

A posição contrária é chamada de idealismo, que nega a existência dessa realidade exterior, estando sempre vinculada à representação e cognição humana²⁰ (REALE e ANTISERI, 2004). Há uma extensa gradação de posicionamentos filosóficos

20 Há posições idealistas que não negam a existência da realidade exterior. Seus defensores afirmam que ela pode existir, porém só se pode conhecê-la por meio das idéias, de modo que só existe a razão subjetiva.

que intencionam responder diferentes perguntas relacionadas à realidade²¹. O embate entre estas correntes é intenso, e parece longe de uma decisão final. (TIERCELIN, 1999)

Estas questões epistemológicas podem também ser aplicadas ao conhecimento científico, visto que a ciência nasce da filosofia e agrega-lhe mais questionamentos e pontos de reflexão.

É bem sabido que mesmo após a ciência e a filosofia haverem assumido identidades mais ou menos distintas, a partir da era moderna, elas não cessaram de todo de se influenciar mutuamente. (CHIBENI, 1997, p.3)

Entretanto, o conhecimento científico toma lugar de destaque nessa discussão acerca da realidade, pois devido às especificidades da atividade científica surgem outros problemas epistemológicos. Segundo Pinheiro:

O conhecimento produzido pela atividade científica incluiu novas formas de representação da realidade e, desde então, o esclarecimento e a justificação dos modos pelos quais as teorias científicas apreendem o mundo real tornou-se uma das preocupações dos estudos em Filosofia da Ciência e incrementou ainda mais a discussão entre realistas e anti-realistas. (PINHEIRO, 2003, p.24)

Desta maneira, o cientista passa a ser encarado como aquele que seria capaz de colocar um ponto final nesta discussão, visto ser ele quem lida com o mundo real, possuindo, assim, as condições mais apropriadas para acessar a realidade por meio de suas teorias e seus modelos. Porém, a ciência e o fazer científico tornaram as discussões filosóficas e epistemológicas ainda mais complexas e sofisticadas.

Contudo, a vinculação entre a Filosofia e a Ciência não é nítida para a maioria das pessoas. Segundo Paty, a crença usual é que as ciências, particularmente a física, seriam uma espécie de tecnologia do saber, que serviria apenas para aumentar ainda mais o conhecimento, podendo, em sua prática cotidiana, dispensar a filosofia. Por outro lado, a filosofia seria como um luxo do pensamento ocidental. (PATY, 1995). Em relação ao Ensino de Ciências, conhecendo os sérios problemas encontrados no sistema educacional brasileiro, não seria ilícito, ou injusto, afirmar ser esta a consideração feita pela imensa maioria dos alunos sobre estas duas áreas do pensamento humano. Logo, acreditamos que também é dever de um educador revelar aos estudantes que

21 Para discussões mais profundas acerca da possibilidade de acesso das teorias científicas a uma realidade exterior ver BUNGE, 1974; SILVA, 1998; VAN FRAASSEN, 1980; PLASTINO, 1995.

[...] a ciência não é esse monstro frio, nem a filosofia esse ornamento inútil. Que há entre as duas uma relação que só aparece depois, globalmente, num momento de avaliação geral; que essa relação tece a própria vida da ciência, pois os problemas filosóficos nela surgem a cada passo assim que tentamos compreender, avaliar o que é adquirido e o que está sendo adquirido. (PATY, 1995, p.21)

Assim, achamos necessário discutir concepções básicas sobre a relação entre a física e a filosofia, entre as teorias e a realidade, apresentando uma concepção de realismo científico com algumas críticas feitas por seus opositores.

2.6 – Realismo científico

Os pontos centrais desta discussão repousam sobre duas grandes questões: quais são as fontes do conhecimento, ou seja, seus processos e fundamentações; e qual é a extensão, ou quais são os limites do conhecimento, isto é, o que pode e o que não pode ser conhecido (CHIBENI, 1997). As tentativas de responder a essas perguntas originam as mais diferentes correntes filosóficas que estão situadas entre os extremos realista e anti-realista.

As discussões acerca dos limites do conhecimento são mais relevantes para esse trabalho, visto que expõem claramente as principais oposições entre os realistas e anti-realista frente à questão do realismo científico. Assim, não abordaremos os problemas relacionados às origens do conhecimento.

Ainda que tenha recebido diversas formulações diferentes, o realismo pode ser apresentado, segundo Chibeni, como

[...] uma tese sobre o problema epistemológico dos limites do conhecimento
[...] O realismo científico sustenta que aquilo que as teorias científicas afirmam acerca do mundo sub-fenomênico pode, de fato, representar conhecimento genuíno; o conhecimento humano seria passível de avançar além dos limites do que é diretamente observável. (CHIBENI, 1996, p.48)

Assim, defensores do realismo científico afirmam que algumas entidades inobserváveis definidas pelas teorias científicas (como, por exemplo, os fótons e pacotes de onda) realmente existem, conferindo-lhes um estatuto ontológico. Surge aqui um outro problema, agora relacionado à noção de *verdade*, já que

[...] as teorias científicas possuem um valor-de-verdade (o verdadeiro ou o falso), uma vez que os enunciados teóricos referem as entidades externas à teoria, sendo que estas entidades realmente existem. O realista mostra-se comprometido com entidades inobserváveis. (SILVA, 1998, p.7)

Isso significa que se um realista aceita que determinada teoria é verdadeira ele então aceita que os entes inobserváveis por ela postulados também são verdadeiros, logo existem, são entes reais. Assim, se faz necessário que haja uma relação entre a verdade das teorias científicas e a existências dos inobserváveis²². Logo, ao se aceitar uma teoria científica como verdadeira, tem-se a aceitação de que ela fornece um relato verdadeiro de como o mundo é.

22 Contudo, esta necessidade é desconsiderada por outros defensores do realismo. Hacking (1983) sustenta que uma teoria verdadeira não implica em um realismo de entidades, de modo que pode haver realistas de teorias que não se comprometem com o realismo de entes inobserváveis. E, no sentido inverso, pode alguém ser realista apenas de entidades e anti-realista em relação às teorias.

Questionamentos como “o que é a verdade”, ou “o quão verdadeiro é uma proposição científica” fazem parte da filosofia da lógica, e o conceito de verdade também é fonte de inúmeras discussões filosóficas²³. Muitas teses realistas são negadas a partir do compartilhamento ou não da versão de verdade por elas adotadas²⁴. De modo geral, a concepção clássica de verdade é relacionada à *verdade como correspondência* dos fatos. Partindo da premissa da existência de uma realidade externa e autônoma, uma afirmação elaborada pela ciência, que intenciona descrever como são as coisas no mundo, poderá ser considerada verdadeira ou falsa dependendo de sua correspondência com os fatos objetivos. Assim,

O mundo externo, portanto, se estabelece como o tribunal das proposições (e das teorias). Entenda-se porém, que o mundo aqui não significa apenas o mundo externo observável, mas também um mundo constituído por entidades inobserváveis. (SILVA, 1998, p.7)

Portanto, a verdade como correspondência considera a verdade como uma adequação do intelecto à realidade, ou da realidade ao intelecto. Em outras palavras, as idéias são correspondentes às coisas que elas representam ou as coisas correspondem às idéias que as representam²⁵.

Outro conceito de verdade considera-a dependente de um conjunto de princípios e regras precisas e rigorosas. Logo, uma proposição agora não é considerada verdadeira por corresponder a uma realidade externa, mas o critério da validade se dá por uma coerência lógica. As idéias precisam ter argumentos encadeados de maneira lógica, que obedeçam às regras e enunciados corretos, para que um raciocínio seja verdadeiro. Este conceito é conhecido por *verdade por coerência interna*.

Uma vertente diferente de verdade é denominada de *pragmatismo*, na qual o critério de definição de verdade é fornecido por uma condição prática e não teórica. Isto é, uma idéia é verdadeira se seus resultados e aplicações são verificados experimentalmente.

A pertinência da discussão sobre as definições expostas acima reside na importância que noção de verdade tem para defender as teses do realismo e anti-realismo. Ambas as utilizam sempre como um instrumento de crítica, tentando invalidar os argumentos de seus opositores.

23 Para discussões mais gerais acerca da verdade ver Haack, 1978.

24 Para maiores discussões ver Chibeni, 1997.

25 A concepção clássica de verdade como correspondência é condição necessária ao realismo científico. Isso fornece argumentos para severas críticas dos anti-realistas e também dos próprios realistas, visto que tal concepção abre margem para a fundamentação do realismo ingênuo.

Os argumentos anti-realistas se encontram difundidos entre um vasto número de escolas de pensamentos, como os relativistas, idealistas, redutivistas, convencionalistas, empiristas lógicos, empiristas construtivos, instrumentalistas etc. Ressaltaremos aquelas doutrinas que compartilham com o realismo a idéia de verdade como correspondência: redutivismo, empirismo construtivo e instrumentalismo.

A tese redutivista, forma de anti-realismo tributária do positivismo lógico, distingue os enunciados teóricos dos enunciados observacionais. Com isso, as proposições teóricas se referem, apenas de maneira indireta, ao domínio do que é observável. Deste modo, tais enunciados da ciência não devem ser interpretados literalmente, mas *“reduzidos” a proposições observacionais por meio de regras de correspondência para que seu verdadeiro conteúdo empírico e significado se evidenciem*. (CHIBENI, 1996, p.49).

O empirismo construtivo foi proposto por Bas van Fraassen (1980), que se opunha à existência de entidades inobserváveis postuladas pela ciência. Ainda que considere os enunciados científicos genuínos, van Fraassen afirma que a aceitação de uma teoria requer apenas a crença em sua adequação empírica. Contudo, não se trata de um processo de descoberta sobre o mundo, mas trata-se de um processo “construtivo” de modelos empiricamente adequados. Logo, os cientistas devem construir seus modelos para estarem em acordo com os fenômenos, não necessitando serem verdadeiros os entes inobserváveis, que seriam, assim, somente ficções.

Já a tese instrumentalista, que explicitaremos um pouco mais devido ao seu forte vínculo com alguns posicionamentos determinantes da interpretação de Copenhague, sustenta que as teorias científicas não devem ser consideradas nem verdadeiras nem falsas. Esta doutrina anti-realista diferencia os conceitos teóricos dos entes e processos observáveis, considerando que

As teorias são compreendidas como instrumentos projetados para relacionar um conjunto de estado de coisas observáveis com outros. (CHALMERS, 2001, p.189)

Os defensores de uma versão instrumentalista mais radical consideram que a ciência não consegue ir além daquilo que é observável, sendo impossível explicar uma realidade independente dos resultados experimentais, de forma que as proposições científicas seriam meramente instrumentos de cálculo e predição. Este posicionamento foi o que levou Heisenberg a rejeitar a noção de órbita dos elétrons proposta por Bohr, já que estas não podiam ser diretamente observadas.

Uma versão menos radical, mas ainda anti-realista, simplesmente defende que a ciência não precisa se preocupar com a existência ou não de entidades inobserváveis. Em suma

As descrições do mundo observável serão verdadeiras ou falsas se descritas corretamente ou não. As elaborações teóricas, no entanto, são projetadas para nos dar um controle instrumental do mundo observável e não devem ser julgadas em termos de verdade ou falsidade, mas antes em termos de sua utilidade como instrumentos. (CHALMERS, 2001, p.189)

Assim, o anti-realista considera que os construtos científicos são elaborados sem um referente externo, sem comprometimento com um estatuto ontológico, sendo ficções convenientes, que facilitam os cálculos e propiciam explicações.

Ambos os posicionamentos possuem pontos filosóficos frágeis que são explorados por seus respectivos opositores.

Ainda que não haja uma homogeneidade entre as doutrinas, quase todos os tipos de anti-realistas atacam os realistas utilizando o argumento de que as explicações e predições das teorias científicas se baseiam em supostos mecanismos inacessíveis à observação direta. Assim, os dados empíricos são, por princípio, insuficientes para determinar o valor de verdade de algumas proposições fundamentais (CHIBENI, 1996). Com isso, nada impede que um mesmo fenômeno possa ser explicado por diferentes teorias (mesmo que falsas!), de maneira que não se pode inferir a existência de um referente real que valide a teoria. Ou seja, as teorias são empiricamente equivalentes, porém ontologicamente distintas! Este argumento está relacionado à tese da *subdeterminação empírica*. Ou seja, *“é possível que duas teorias incompatíveis em suas proposições teóricas sejam equivalentes empiricamente, isto é, coincidam no que afirmam a respeito do observável”*. (CHIBENI, 1996, p.50).

Da mesma forma, os realistas criticam seus opositores. A crítica mais contundente se refere aos problemas encontrados pelos anti-realistas ao negar o sucesso preditivo das teorias científicas. Para os realistas, como a ciência é capaz de prever uma série de fenômenos de naturezas variadas, tal sucesso evidencia a existência de entes não-observáveis. Smart (1968), por exemplo, desenvolve o argumento conhecido por “coincidência cósmica”, onde afirma que *“Se as entidades não-observáveis postuladas pela teoria não existissem, e se o que a teoria diz sobre elas não fosse aproximadamente verdadeiro, somente uma coincidência de proporções cósmicas poderia explicar seu sucesso empírico”*. (CHIBENI, 1996).

Assim, os realistas desafiam os anti-realistas a responderem esta questão. Isso origina uma série de contra-argumentos por parte dos anti-realistas, gerando, numa espécie de retro-alimentação, uma discussão aparentemente infundável.

Mesmo considerando que “*o debate entre realistas e anti-realistas parece fadado a um definitivo empate técnico*” (PIETROCOLA, 1999) para este autor, o transcorrer deste debate trouxe inúmeras contribuições para o conhecimento e entendimento do mundo.

2.7 – Implicações para o Ensino de Ciências

Sabidamente, cada vez que o conhecimento científico avança, ele se diferencia mais do real observado. Entretanto, as teorias científicas são elaboradas na tentativa de perscrutá-lo, embora as representações da realidade criadas pela ciência fiquem cada vez mais abstratas. Paradoxalmente, a ciência torna-se mais próxima da realidade quanto mais dela se afasta. Com isso, esta “estranha” aproximação torna imprescindível uma profunda reflexão sobre os fundamentos da ciência, seus processos de construção e de validação, de modo que se possa confrontar o conhecimento científico com o senso comum, transformando a imagem da realidade.

Ainda que seja complexa a diferenciação entre as concepções científicas sobre o real e a própria realidade, é preciso que se criem condições para fomentar tais debates em sala de aula. Pode-se, assim, fazer com que os estudantes não considerem as representações científicas da realidade meramente como cópias da própria realidade, tampouco que as considerem apenas como proposições científicas que devem ser válidas apenas por sua utilidade experimental ou tecnológica.

Desta maneira, acreditamos ser um total desperdício privar os alunos do Ensino Médio de discutirem e perceberem as diferenças entre a construção e a realidade. Nossa preocupação vai além dessa sensação de perda. É preciso que se estabeleça claramente um posicionamento epistêmico quando se ensina conteúdos científicos, particularmente em relação aos tópicos de FMC²⁶. A exigência de um alinhamento epistemológico no ato de ensinar é decorrência de que

de fato se constata, para a grande maioria dos professores, que suas ações pedagógicas e as suas relações com o conhecimento da disciplina por eles ministradas, são, fundamentalmente, baseadas em decisões e ações irrefletidas, imaturas, quando não preconcebidas intuitivamente. (LABURÚ E SILVA, 2000, p.2)

Quanto à definição de um posicionamento epistemológico no ato de ensinar, encontram-se na literatura diversas pesquisas (ABEL e SMITH, 1994; IRWIN, 2000; NOTT e WELLINGTON, 1998; SOLOMON, 1991; SONGER e LINN, 1991) que implicitamente corroboram nossa afirmação, pois revelam a importância de o professor de ciências ir além do domínio do conteúdo que leciona e das modalidades didáticas a ele relacionadas, sendo necessário também conhecer quais são as origens do conhecimento científico, seus processos de construção e validação e quais características distinguem-no de outras áreas do conhecimento.

26 Ainda que cientes de que as discussões sobre a realidade expostas neste trabalho possam ser também vinculadas aos temas tradicionalmente abordados no ensino de Física Clássica.

O desconhecimento do processo de “*fabricação da ciência*” (CHALMERS, 1994) faz com que o professor não perceba qual é a visão de ciência que passa para seus alunos. Assim, rezeamos que esta postura imponderada possa fazê-lo mostrar as representações científicas por meio de um realismo ingênuo ou do anti-realismo.

Consideramos problemático um posicionamento epistemológico calcado no realismo ingênuo, pois isso fará com que o aluno acredite que o acesso à realidade é imediato, feito apenas por meio da percepção, de modo que o mundo passa a ser considerado apenas pelos fenômenos e objetos percebidos pelos sentidos. Desta maneira, não há espaço para a compreensão mais profunda sobre a realidade, tornando dispensável, por exemplo, o entendimento dos fenômenos e objetos quânticos, já que estes são inacessíveis à percepção primeira. Assim:

O realismo ingênuo se constitui num obstáculo epistemológico ao processo historicamente constituído de busca de entendimento sobre o mundo, impedindo que viajemos através de nossa mente, onde a imaginação é o barco e a razão o leme. (PIETROCOLA, 2001b).

Quanto à visão anti-realista, algumas pesquisas indicam suas características negativas para o Ensino de Ciências (MATTHEWS, 1994; OSBORNE, 1996; OGBORN, 1997; PIETROCOLA, 1999; LABURÚ e SILVA, 2000)²⁷.

Matthews (1994) afirma que um ensino de ciências que enfatize a crença na inexistência de uma realidade externa, independente do sujeito, torna confusa a distinção clara entre os objetos teóricos e os objetos reais. Segundo Osborne (1996), ao se desconsiderar um mundo externo, cria-se uma falha epistemológica, que leva a um abandono das noções de verdade conduzindo a uma epistemologia instrumentalista e fornecendo uma visão equivocada da ciência.

No cerne destas críticas, encontra-se uma defesa do realismo científico. Para estes autores, quando se introduz na sala de aula a idéia de que a ciência não lida com a realidade, ou que suas teorias não são capazes de apreendê-la, servindo apenas como um útil instrumento de cálculo e predição, não faz sentido esperar que os alunos se esforcem para compreender e incorporar as representações científicas.

Com isso, acreditamos que seja extremamente relevante para o Ensino de Ciências

[...] tentar enfrentar a polêmica sobre o conhecimento e de que forma ele representaria uma realidade exterior, pois as pessoas mantêm um posicionamento realista a despeito do debate existente no contexto da filosofia.

27 A quase totalidade desses trabalhos traz críticas ao construtivismo educacional nas suas mais variadas versões. As críticas recaem sobre o abandono dos compromissos ontológicos e epistemológicos por essa corrente pedagógica, bem como sobre o posicionamento relativista por ela adotado. Este posicionamento dá margens para um tratamento anti-realista da ciência (PIETROCOLA, 1999)

Ou seja, a realidade enquanto idéia não parece ter sido abandonada no discurso vulgar das pessoas. (PIETROCOLA, 2002b)

Este autor utiliza o termo *atitude ontológica natural* (cunhado originalmente por FINE, 1984) para revelar a tendência a um realismo mínimo por parte dos seres humanos. Esta necessidade é fruto da vontade do homem fixar suas crenças e concepções em um mundo externo a ele, o que o leva a dar preferência à construção de representações com uma essência realista. Pietrocola ainda destaca que esta *atitude ontológica natural* pode ser resultado do processo de evolução da espécie humana. Isto é, considerar a existência de uma realidade externa teria sido de extrema importância para garantir a sobrevivência da espécie no processo de adaptação evolutiva.

Quanto seres humanos geraram descendentes ao duvidar da “realidade” dos entes presentes no seu cotidiano?! Admitir a existência da realidade em comparação com o simplesmente pensado ou imaginado deve ter se constituído numa habilidade das mais importantes para a sobrevivência do homem. (PIETROCOLA, 2002b)

Esta *atitude ontológica natural* parece também estar presente nos cientistas, não sendo exclusiva ao cidadão não-especializado. Segundo Chibeni (1992), ainda que as pesquisas teóricas avancem cada vez, os cientistas raramente levam em conta considerações anti-realistas enquanto fazem seu *hard work*. Para Laburú e Silva (2000), foi possível “*extrair a defesa de um forte sentimento de caráter realista e objetivo [...]*” ao analisarem o pensamento de cientistas proeminentes, como Weinberg e Feynman, revelando uma tendência realista sobre as teorias científicas. Corroborando esta visão, Kitcher (1993) defende que a grande maioria das pessoas é realista. Para ele,

Poucos nascem anti-realistas e aqueles que aderem ao anti-realismo tipicamente o fazem porque isso lhes foi imposto por argumentos aos quais se sentiram incapazes de recorrer. (KITCHER, 1993, p.130)

Desta forma, Pietrocola (1999) defende que a educação científica deveria estabelecer vínculos entre os domínios cognitivo e ontológico, de modo que o Ensino de Ciências deveria ter como motivo preferencial a compreensão do mundo. Para isso, essa vinculação estaria diretamente conectada ao posicionamento filosófico sobre o que é a realidade e como a ciência a apreende.

Com relação às ciências, para Bunge, *“Toda idéia física refere-se explicitamente a um objeto real, e a idéia em questão perde todo o valor quando verificamos que esse objeto não é real”*.(BUNGE, 1974, p.17). Segundo Paty:

[...]a generalização do predicado de existência, ou de realidade dos objetos físicos, pertence ao conhecimento científico, pois é sobre o real, precisamente, e nada mais, que ele nos instrui. O real é o objeto da ciência em sua generalidade, e constitui sua referência fundamental. (PATY, 1985, p.266)

Considerando as afirmações acima, acreditamos que o Ensino de Ciências tem por dever permitir que os alunos construam ferramentas intelectuais que lhes permitam atingir um nível mais profundo da realidade, compreendendo as representações mais elaboradas, criadas pela ciência, para apreendê-la. Para isso, defendemos um posicionamento realista para o Ensino de Ciências (em especial para o ensino da Mecânica Quântica), considerando que é a *“busca das entidades ontológicas escondidas que permitem o entendimento do que se percebe superficialmente com os sentidos”*. (PIETROCOLA, 2002b)

Entretanto, o real é apreendido por meio dos objetos teóricos construídos pela ciência, que são invenções intelectuais que têm correspondência com objetos reais pertencentes a um mundo externo e independente, de maneira que as construções científicas pretendem aproximar-se deles. Com isso, a realidade é apreendida pela teoria (BUNGE, 1974; PATY, 1985). Contudo, esta concepção não implica que uma proposição científica, por corresponder a uma realidade exterior, seja uma cópia desta realidade, dando origem a uma visão realista ingênua da realidade e da ciência. É preciso que se considere que os objetos criados pela ciência não são dados captados espontaneamente pelos sentidos humanos, mas são construtos teóricos, construídos pelo trabalho científico.

Entretanto, o abandono do realismo ingênuo não pode permitir uma adesão ao anti-realismo. Uma crítica dos anti-realistas recai sobre a dependência teórica do mundo. Assim, para os opositores do realismo, a necessidade das construções intelectuais para sondar a realidade é indício de uma inexistência autônoma do mundo (ou de uma incapacidade para conhecê-lo). Isto é, os defensores do anti-realismo criticam a passagem dos efeitos às causas, considerando-a *“como um apelo platônico de identificação entre a mente e o mundo”* (SILVA, 1998, p.9).

Ainda que exista esta dependência teórica para acessar a realidade, cabe perguntar *“[...]por que isso condena a idéia de que há algo independente de nós ao*

qual temos acesso através de processos que são dependentes dos estados da ciência e do senso comum? (KITCHER, 1993, p.131).

Segundo Barra (1998), ainda que as crenças científicas possuam valores cognitivos, isso não exclui a existência de um mundo independente destas crenças. Bunge (2000) utiliza-se dos conceitos de “*coisa em si*” e “*coisa para nós*”, forjados por Kant no século XVII, para estabelecer um *realismo crítico*²⁸. Assim,

o realismo crítico sustenta: a) que a coisa em si pode ser conhecida de maneira gradual e b) que a coisa para nós não é a que se apresenta aos sentidos mas é caracterizada pelo conhecimento científico. Além do mais, o realismo crítico não supõe que a coisa em si é cognoscível como tal, isto é, sem introduzirmos qualquer deformação (traços de remoção e/ou adição). O que distingue o realismo crítico de outras variedades de realismo é precisamente o reconhecimento de que uma tal distorção é inevitável, pois idéias não são algo que se encontre pré-fabricado: nós a excogitamos laboriosamente e as corrigimos incessantemente ou até renunciamos a elas inteiramente. (BUNGE, 2000, p.129)

O caráter ontológico faz com que os construtos da ciência sejam considerados como elementos existentes na estrutura do mundo, que agora passa a ser melhor conhecido. Estas criações científicas permitem então que se atinjam níveis cada vez mais profundos da realidade, desfazendo a imagem de que são uma ficção, apenas uma útil formulação matemática.

Diferentemente do realismo ingênuo, esta forma de realismo considera insuficiente a apreensão da realidade por aquilo que ela oferece aos sentidos, de maneira que a percepção do mundo externo deve ser transformada, “ampliada” pelo conhecimento teórico. Nesse sentido, consideramos que o Ensino de Ciências tem o papel de municiar os estudantes de objetos teóricos capazes de fazê-los perceber a realidade além das aparências, visto que as teorias científicas utilizam objetos construídos intelectualmente que estão para além da percepção.

Não se trata, por certo, de um realismo não crítico, mas de um realismo que, embora postulando a existência autônoma do mundo externo, está pronto a corrigir toda reconstrução conceitual do referido mundo – um realismo que reconhece que, embora as teorias físicas intencionem mapear seções da realidade, elas o fazem de uma maneira fragmentária, imperfeita e simbólica mais do que de um modo total e literal. (BUNGE, 2000, p.231)

²⁸ Bunge, entretanto, abandona as teses kantianas de que a “coisa em si” é incognoscível e que a “coisa para nós” é idêntica à sua aparência.

Estamos cientes que evitaremos uma série de questões embaraçosas ao defendermos a utilidade de uma determinada forma de realismo no ensino da Física sem detalharmos as teses filosóficas que o apóiam ou o criticam. Como exposto anteriormente, os posicionamentos realista e anti-realista são, há séculos, objetos de uma extensa e profunda divergência entre os filósofos. Evidentemente, não temos a pretensão de colocar um fim nestes debates, sequer teríamos espaço nesta dissertação para tratar com rigor os argumentos filosóficos que fundamentam esta defesa, burilando nossos argumentos. Nossa intenção é levantar a discussão sobre a necessidade de reflexões epistemológicas mais profundas quando se pede a inserção, ou mesmo a manutenção, de determinadas áreas do conhecimento científico nas salas de aula.

Ainda que exista uma pressão por parte da comunidade de Ensino de Ciências para a inserção de tópicos de FMC no Ensino Médio, são raríssimos os trabalhos que investigam a influência de uma ontologia de base no ensino desses tópicos. Por exemplo, é amplamente discutido o caráter estranho, “irreal” dos objetos quânticos, mas qual a relevância desse estado ontológico no momento de ensinar e aprender a Mecânica Quântica? Acreditamos que é necessária a elaboração de perguntas como essas, exigindo um esforço maior da comunidade acadêmica em tentar levantar indícios capazes de respondê-las.

Não consideramos esta necessidade privilégio dos fenômenos quânticos. Certamente que a *Física Clássica* fornece uma série de elementos passíveis de serem abarcados por essas reflexões. Ainda que os objetos quânticos

escapem, com efeito, à experiência cotidiana, como a qualquer percepção intuitiva, o que [...] não significa que haveria uma diferença de natureza entre o conhecimento dos objetos quânticos e os dos outros objetos físicos. (PATY, 1985, p.268)

O problema reside na distância existente entre o pensamento e a realidade exterior. Mesmo na Física Clássica conceitos como energia, momento, calor, campos etc. causam perplexidade quando se analisa sua construção teórica e seu vínculo com o mundo, revelando sérias complexidades nessa relação. Contudo “*esse corte manifesta-se de modo mais claro, e mais imediato, no caso dos fenômenos quânticos.*” (PATY, 1985, p.268).

Desta maneira, “[...] contempladas no ensino, essas polêmicas questões epistemológicas e ontológicas se transformam também numa lição pedagógica.” (FAGUNDES, 1997, p.52)

2.8 – A necessidade da realidade no ensino da Mecânica Quântica

Como os temas de Física Moderna estão muito afastados do senso comum e, na maioria das vezes, não se pode mais utilizar conceitos que são familiares para a compreensão das sutilezas envolvidas na Física Quântica, é comum que esse desconforto se traduza em um sentimento de ausência de realidade. Isto é, pode-se passar a impressão de que toda explicação e descrição envolvidas nessas teorias são apenas artifícios matemáticos e científicos, sem referentes no mundo real e percebido.

Junta-se a isso o fato de que a Teoria Quântica tem, como vimos, a peculiaridade de permitir diversas interpretações, e que a grande maioria delas flerta com alguma forma de anti-realismo. Segundo Chibeni

As dificuldades de se conceber uma realidade compatível com uma interpretação realista da Mecânica Quântica levaram os físicos a propor interpretações instrumentalistas e idealistas, em uma escala sem precedentes na história da ciência. (CHIBENI, 1992, p.157)

A afirmação deste autor pode ser confirmada pela fala de Niels Bohr: “[...] *uma realidade independente no sentido físico ordinário não pode ser atribuída nem aos fenômenos, nem aos agentes da observação.*” (BOHR, apud PESSOA JR, 2000). Esta visão prevaleceu durante muito tempo na comunidade científica e ainda aparece, explícita ou implicitamente, na imensa maioria dos livros técnicos e didáticos.

Assim, por exemplo, o aparecimento, no ato da medida, de um valor preciso que não existia anteriormente a ela ganha a interpretação de que a observação cria a realidade. Esse tipo de interpretação, defendida por Bohr, Heisenberg, Dirac, Van Fraassen, entre outros, obriga uma revisão profunda das clássicas concepções filosóficas e físicas acerca da realidade. Por outro lado, físicos do peso de Einstein, Schrödinger e de Broglie, que também participaram da construção da Teoria Quântica, não acreditavam que ela fosse capaz de descrever de maneira completa a realidade (CHIBENI, 1997).

Não faz parte do escopo deste trabalho discutir aspectos sobre a completude, ou incompletude, da Mecânica Quântica. Tampouco pretendemos esgotar uma discussão, até hoje não resolvida, acerca da ontologia de objetos e processos quânticos. Queremos enfatizar a necessidade de tratar a Física Quântica no Ensino Médio sob perspectiva de um realismo científico crítico. Acreditamos que “*O conhecimento está associado ao enriquecimento do conteúdo de realidade dos símbolos empregados no tratamento formal dos problemas teóricos.*” (ROBILOTTA, 1987, p.12)

Nossa preocupação pode ser ratificada em uma pesquisa citada por Matthews (1994), onde 254 alunos de nível médio deveriam dizer se achavam útil ou não o fato de que a Física utiliza experimentos de pensamento que não podem ser reproduzidos por experimentos reais. Mais de 50% da totalidade dos alunos consideraram tal método útil somente para a física, por não se tratar da realidade e 11% acharam-no inútil, pois não há necessidade de se considerar algo que não existe. Assim, essa dicotomia entre a realidade do mundo da Física Moderna e o real percebido pode conduzir o aluno a se perguntar:

Qual dos dois abandonar, por ser uma ilusão: o mundo real em que vivo e que percebo ou o mundo da ciência repleto de situações idealizadas como pontos sem massa, substâncias puras[...] etc.? (BARRA, 1998, p.24)

Assim, parece-nos que os alunos não disponibilizariam esforços para tentar compreender e aprender aquilo que não é real. Seria como se eles perguntassem: para que tenho que aprender sobre o fóton se ele não existe? Ou seja, “[...]se negligenciarmos a realidade ou negarmos que haja uma qualquer, acabaremos por renunciar à ciência e adotar, em seu lugar, a pior metafísica possível.” (BUNGE, 1969, p.16)

Defendemos que o ensino de Física Moderna deve ter como norteador que “O referente pretendido de qualquer idéia física é a coisa real.” (BUNGE, 1969, p.15) Com isso, deve-se buscar abordagens que possibilitem um tratamento diferenciado daquele que usualmente aparece nos livros técnicos, principal fonte de referência para a transposição desses conhecimentos para os livros didáticos do Ensino Médio. É imprescindível que haja essa preocupação, pois “[...]para se ensinar física, é preciso também saber administrar a costura dos símbolos formais na realidade.” (ROBILOTTA, 1987, p.12)

Portanto, uma discussão acerca do compromisso das teorias físicas com a realidade é uma etapa que não pode ser negligenciada no processo de construção de vínculos entre o mundo subjetivo dos alunos com aquele oferecido pela Física. Assim, é preciso que haja discussões na escola acerca da maneira com que a ciência captura ou não a realidade, de modo que

Educadores histórica e filosoficamente instruídos saberão reconhecê-las e considerá-las, auxiliando seus alunos a entender porque no mundo real, subjetivo e vivido, cachorros e átomos podem coexistir harmoniosamente. (BARRA, 1998, p.25)

Fornecer um status ontológico para os objetos quânticos seria permitir encontrar-se com uma realidade escondida, inacessível pelos sentidos. Tratar o ensino da Mecânica Quântica sob esse prisma pode ser uma forma de torná-lo mais interessante, motivador, de modo que os alunos do Ensino Médio possam vislumbrar o quanto é fascinante a nova maneira de perceber a realidade imposta por essa teoria.

Em face ao que foi aqui exposto, acreditamos que seja necessário criar momentos nos quais seja possível levar os alunos a travarem discussões filosóficas, de caráter epistemológico e ontológico acerca das teorias físicas. Momentos estes que, infelizmente, raramente são considerados quando se propõe a inserção destes temas no Ensino Médio. Esta forma de inserção possibilitaria a geração de formas alternativas de avaliação, criação de atividades e exercícios, fornecendo um caminho alternativo que pode auxiliar na difícil tarefa de transpor estes conhecimentos para as salas de aula.

3. A Transposição Didática: uma ferramenta de análise

3.1 – A Transposição Didática

Como foi dito no primeiro capítulo, parece consensual a necessidade da inserção de FMC no Ensino Médio. Entretanto, este processo ainda se inicia. São poucas as tentativas de implementação de tópicos relacionados a esta parte da Física. Professores da escola média e pesquisadores em ensino parecem tatear, movendo-se muito lentamente, como se movessem no escuro, temendo por demais cada novo passo.

Certamente, a cautela na abordagem de FMC no Ensino Médio não é difícil de ser entendida. Os desafios são impostos não apenas pela complexidade intrínseca destes tópicos, mas também por uma insegurança inerente a qualquer tentativa de mudança no domínio escolar. Acrescente-se a isso, o sistema de ensino que, na maioria das vezes, dificulta, e até impede, qualquer tipo de inovação.

Grande parte dos professores está presa a um cenário pedagógico sem muita flexibilidade, seja por prescrições de conteúdo, horários restritos e especificidades de suas próprias disciplinas. Não é incomum o professor sentir-se cerceado pelas condições que lhe são impostas na escola, como a preocupação exacerbada com o cumprimento do programa ou a pressão por resultados no vestibular. Isso sem levar em conta o tamanho das turmas e a extensão dos currículos.

Desta forma, cada inovação curricular se torna uma pequena batalha travada entre professores, escola e alunos. Infelizmente, na maioria das vezes, é uma guerra de derrotados, sem qualquer vencedor.

Como não se vence uma batalha sem conhecer bem seus “inimigos”, é preciso entender em profundidade os motivos que tornam o ensino tradicional de Física tão refratário às mudanças. Acreditamos que ao compreender melhor como a produção científica migra da comunidade acadêmica para a sala de aula, estaremos mais capacitados para a proposição de alternativas que garantam uma inserção efetiva de conceitos de Física Moderna no Ensino Médio.

A idéia de Transposição Didática foi formulada originalmente pelo sociólogo Michel Verret, em 1975. Porém, em 1980, o matemático Yves Chevallard retoma essa idéia e a insere num contexto mais específico, tornando-a uma teoria e com ela analisando questões importantes no domínio da Didática da Matemática.

Em seu trabalho, Chevallard (1991) analisou como o conceito de “distância” nasce no campo da pesquisa em matemática pura e reaparece modificado no contexto do ensino de Matemática. Ele define a Transposição Didática como um instrumento eficiente para analisar o processo através do qual o saber produzido pelos cientistas (o Saber Sábio) se transforma naquele que está contido nos programas e livros didáticos (o Saber a Ensinar) e, principalmente, naquele que realmente aparece nas salas de aula (o Saber Ensinado). Chevallard analisa as modificações que o saber produzido pelo “sábio” (o cientista) sofre até este ser transformado em um objeto do saber escolar. Nessa concepção, o processo de inserção de conceitos científicos nas escolas é a arte de construção de objetos de ensino.

Talvez a principal contribuição do trabalho de Chevallard tenha sido apresentar claramente as modificações de um conceito ao ser transposto do contexto da pesquisa para o do ensino. Um conceito matemático ao ser transferido, transposto, de um contexto ao outro, sofre severas modificações. Ao ser apresentado no ensino, tal conceito guarda semelhanças com a idéia original nascida no contexto da pesquisa, porém já não é mais o mesmo conceito. Esse processo de transposição transforma o saber, dando-lhe um outro caráter epistemológico (ASTOLFI e DEVELAY, 1995).

Ao se trabalhar no Ensino de Ciências, lida-se sempre com esse saber “modificado”, de maneira que parece ser de suma importância ter uma maior compreensão deste processo de transposição.

Como há uma carência de atividades e materiais instrucionais relativos à Física Moderna acessíveis ao Ensino Médio, com uma linguagem adequada a esse tipo de aluno, acreditamos ser essa uma das etapas de maior importância de todo nosso trabalho. Nosso intuito é a aplicação de uma seqüência de ensino apropriada, com uma série de atividades e materiais produzidos de uma forma que permita a introdução de conceitos fundamentais de Física Quântica, adaptada à realidade dos alunos e escolas brasileiras.

A intenção principal é utilizar a Transposição Didática como instrumento de análise para toda a seqüência, material e atividades criadas. Por meio dela

buscaremos justificar os desvios históricos necessários em nossa seqüência didática bem como defender nossa posição epistemológica quanto à forma de ensinar Física Moderna. Com isso, pretendemos delinear respostas para questões relativas ao que ensinar e, principalmente, como ensinar os tópicos relativos a essa parte da Física.

3.2 – *É natural a forma de se ensinar física?*

As palavras “natureza” e **natural** possuem uma série de significações que variam enormemente de acordo com o contexto em que se encontram. Para Robilotta

A palavra natureza é muito utilizada e tem empregos vários. Falamos, por exemplo, em volta à natureza, comida natural, natureza humana etc.. Apesar de não parecer difícil a compreensão destas expressões, uma análise um pouco mais aprofundada [...] pode levar-nos a questionamentos não triviais, tais como: voltar à natureza significa que chegamos a nos afastar dela? Comida natural implica na existência de alimentos não naturais? [...] parece sugerir um antagonismo entre ela e os seres humanos. (ROBILOTTA, 1985, p.1)

Uma discussão mais profunda acerca de interessantes questionamentos sobre conceitos tidos como naturais, como o conceito físico de espaço ou a relação homem-mulher, pode ser encontrada em Robilotta(1985). Aqui, o significado da palavra **natural**, que aparece na pergunta que forma este subtítulo, é o de que não há intervenção humana, ou como algo que decorre da ordem regular das coisas, livre da ação de normas ou regras convencionais.

Uma fábrica, não obstante ser feita de materiais naturais, não é natural por incorporar de modo forte as intenções humanas. O ser humano, neste quadro, torna-se o responsável (culpado?) pelas coisas artificiais. (ROBILOTTA, 1985, p.1)

A idéia principal é mostrar que sendo considerada **natural** a forma de se ensinar Física implica, então, que isso pode ser feito de maneira espontânea, não planejada ou estudada. Esta forma **natural** denota algo essencial ou próprio do ato de ensinar Física e, portanto, livre de formas alternativas de ensino.

Sendo assim, também pode se discutir algumas concepções que aparecem sobre o sistema de ensino como um todo. Chevallard cita uma concepção encontrada com muita freqüência entre os professores e membros da sociedade:

O mundo – ou melhor esta miniatura: o sistema educacional – dado que é uma obra humana, [...], não seria mais que o fruto de nossas vontades e de nossos caprichos. De nossas vontades, certamente, às vezes insustentáveis; de nossos caprichos, com freqüência egoístas, que deveríamos reencaminhar. (CHEVALLARD, 1991, p.14)

Esta maneira de conceber e se relacionar com o sistema de ensino geram também algumas “explicações” para quando o que se deseja ensinar parece não funcionar muito bem.

E aquilo que dele nos resiste queremos ver como o simples efeito da má vontade de alguns maus sujeitos (os docentes, dramaticamente conformistas, os “sucessivos governos”, o ministro, etc.). (CHEVALLARD, 1991, p.12)

Em cada época, é necessário que o conhecimento científico escolar esteja fundamentado no conhecimento produzido pelos cientistas, e que esse já tenha sido aceito de uma forma consensual pela comunidade científica. A pesquisa em Física induz a um Ensino de Física que deva, a princípio, ser sua própria imagem e semelhança. A partir disso, idéias, conceitos, teorias são, então, transpostos para os programas escolares e materiais didáticos. No entanto, o conhecimento acadêmico deve ser “adaptado” ao ambiente das salas de aula. Isso pode sugerir a idéia de que o Saber a Ensinar e o Saber Ensinado sejam pouco diferentes daqueles presentes nos laboratórios e grupos de pesquisa. Essa forma de conceber o ensino traz embutida a idéia de simplificação do saber.

Com certeza, ninguém é capaz de duvidar que a Física feita nos centros de pesquisas é extremamente complicada. Assim, para se ensiná-la sem torná-la diferente demais parece-nos que a única saída possível é simplificá-la. Então, é **natural** considerar que essa simplificação ocorra, transformando-se em uma boa estratégia de apresentação dos saberes. Essa forma de ver o ensino traz embutida a idéia de simplificação do saber.

À primeira vista somos levados a interpretar que o saber a ensinar é apenas uma mera “simplificação ou trivialização formal” dos objetos complexos que compõem o repertório do saber sábio. (ALVES-FILHO, 2000, p.225)

Assim, opta-se em apresentar primeiro a eletricidade, depois o magnetismo, pois assim parece ser muito mais simples de se ensinar o eletromagnetismo. Ou então, primeiro ensina-se o conceito de espaço, depois de tempo, para então poder ensinar o conceito de velocidade. Pode-se seguir com outros inúmeros exemplos, evidenciando que há muito mais de que uma mera estratégia de apresentação, e que a idéia de simplificação é errônea, ou seja, não é nada **natural** a forma tradicional de se apresentar os saberes escolares.

Para Alves-Filho, esta visão simplificada “é equivocada e geradora de interpretações ambíguas nas relações escolares, pois revela o desconhecimento de um processo complexo de transformação do saber”. (ALVES-FILHO, 2000, p.225).

A idéia de uma simplificação pode ser entendida quando parte do professor, visto que durante sua formação ele tem contato com o saber mais próximo daquele produzido na comunidade científica. Ao utilizar um livro didático para preparar suas aulas e perceber que o sinal de uma derivada (dx), que em seus livros técnicos, era substituído por um sinal de variação (Δx) esta idéia se torna mais forte. Desta forma, ao comparar estes dois domínios, o ambiente acadêmico e o ambiente escolar, parece ser justificável que o professor trate estas modificações apenas como simplificações e, principalmente isso, torna-se tão familiar que o impede de questioná-las.

Esta familiaridade com o objeto de ensino transforma-se em um grande problema, visto que esta “simplificação” passa a ser considerada como neutra, casual, feita apenas para fornecer uma maior acessibilidade para os alunos. Esta impressão é tão forte que passa a ser considerada como algo **natural** dentro do sistema didático. Assim, tem-se que

O saber ensinado supõe um processo de naturalização, que lhe confere a evidência incontestável das coisas naturais; sobre esta natureza “dada”, a escola espera agora sua jurisdição, fundadora de valores que, por conseguinte, administra a ordem didática. (CHEVALLARD, 1991, p.18)

Para o aluno, esta idéia de simplificação do conhecimento transforma-se em um obstáculo ainda maior. A imensa maioria dos conceitos apresentados aos alunos tem pouco (às vezes nenhum) significado para eles. Assim, aquilo que lhes é ensinado difere totalmente do que vivenciam fora da escola. Com isso, raramente conseguem aplicá-los em qualquer outra situação que não sejam aquelas fornecidas dentro da sala de aula. As famosas “condições ideais” só existem nos livros, de maneira que

(..) os exercícios ou problemas jamais tratarão de casos reais, estabelecendo sempre situações ideais. Algumas observações são muito freqüentes ao longo da dinâmica no Ensino Médio, como:

- exclua a resistência do ar;
- considere o plano perfeitamente liso e sem atrito;
- despreze as dimensões do corpo e;

- considere o valor de g constante durante o movimento.(OFUGI, 2001, p.65)

Tem-se assim um ensino que corre um sério risco de tornar-se inadequado, além de ineficiente, pois a capacidade dos alunos de se relacionarem melhor com o mundo onde vivem não é, então, trabalhada.

Contudo, a suposta “simplificação” gera, na verdade, um novo saber, com novo estatuto epistemológico, o Saber Escolar.

O que percebemos é que não existe uma neutralidade na apresentação dos conteúdos, e sim a criação de uma Física Escolar, que embora possua vínculos com a Física Científica, se mostra completamente modificada e transformada. (OFUGI, 2001, p.68)

Mais que razoável, é até desejável que ocorra a produção de um novo saber, mesmo com os riscos inerentes ao processo de criação. As motivações e objetivos de se ensinar e aprender ciências são extremamente diferentes daqueles presentes no fazer científico. Logo, há uma mudança de nicho epistemológico, o que implica uma inevitável transformação do conhecimento. Por isso, o Saber Ensinado e o Saber Sábio, embora conectados, são diferentes. “*O saber ensinado é necessariamente distinto do saber sábio*” (CHEVALLARD, 1991).

Assim, é por meio da comparação do conhecimento com toda sua base científica com aquele que chega até às escolas que surge a idéia do conhecimento escolar ser uma mera simplificação do conhecimento científico.

A existência de atividades, objetos e áreas de estudo presentes exclusivamente no ensino, sem equivalentes na área de pesquisa, serve como forma de mostrar a inexistência de meras simplificações conceituais. Algumas situações de ensino guardam alguma relação com o conhecimento de sua área específica, mas na verdade possuem identidade própria. Elas “existem” apenas como criações didáticas. Neste sentido, Ofugi afirma que

Boa parte dos exercícios de Cinemática e Termometria, por exemplo, nunca foram objeto de estudo da Física. Não existe nenhum grupo de físicos estudando transformações de escalas termométricas, nem tampouco algum que tenha como objeto de pesquisa o tempo de queda de uma lasca de madeira que se solta de uma ponte [Cálculos como esse ou similar estão

presentes em vários livros do Ensino Médio quando o tema MRUV ou Queda-Livre é tratado]. (OFUGI, 2001, p.67)

Aqueles mais puristas chegam a tratar estas criações ou modificações como algo pejorativo, como se tivesse havido uma deterioração do saber científico, transformando-o em algo de menor valor.

Desta forma, ao se dar conta destas transformações sofridas pelo Saber Sábio, ao travar conhecimento com a Transposição de Didática, é muito comum o professor criar uma grande resistência a este conceito, pois

No caso em que se reconheçam os feitos da transposição didática, criação ou substituição de objetos, o professor terá a horrível sensação de que o pegaram com as mãos na massa. A análise – salvo o intencional – da transposição didática é facilmente tida como descobrimento do que estava oculto, e do que havia permanecido oculto era feito porque era culpado. (CHEVALLARD, 1991, p.52)

A importância de se mostrar que a forma usual de ensinar Física não é natural reside justamente em levantar a questão do quanto é possível se obter alternativas a ela. Pois

[...] muitas sensações [ou situações] são percebidas como “naturais” por não haver consciência de um código subjacente. (ROBILOTTA, 1985, p.10)

É esta falta de consciência que deve então ser trazida para discussão. Ao se reconhecer a forma normativa do Ensino de Física pode-se, então, questionar estas normas, refletir sobre estas regras e propor modificações ou substituições.

Assim, todo professor deve sempre ter em mente que o que ocorre, ao se afastar da lógica interna da ciência, é o surgimento de uma nova área de conhecimento: o Ensino de Ciências. Com esse distanciamento, há um alinhamento com epistemologias dominantes, carregando consigo uma concepção de ciências, como ocorreu, por exemplo, com o Empirismo.

Em uma pesquisa realizada por Becker (1997), ao analisar a epistemologia do professor no cotidiano escolar, chegou-se a que o pensamento predominante na prática docente é de natureza totalmente empírica e que o professor é muito resistente a uma mudança de opinião. Assim, ao olhar o saber presente no ensino de Física o que se tem é uma mistura de experimentos e fórmulas e raramente se vê a construção de Princípios e Leis. Isso acontece por exigência da epistemologia dominante que

prioriza a observação e experiências. Com isso, tem-se uma prática pedagógica fundamentada sobretudo na repetição e na reprodução do conhecimento, gerando um ensino extremamente tedioso e dispensável para o aluno.

Com isso, ao se retirar o Saber Sábio de seu ambiente original ele é apresentado numa nova organização conceitual. Além disso, deve-se saber qual é o projeto de formação que se tem em mente (compromisso em formar um cidadão ou um cientista?). E tudo isso permeado sempre pela pergunta: será possível ensinar isso? Um outro professor seria capaz de fazê-lo? (exigência didática). A Física escolar é a combinação de uma lógica conceitual com um projeto de formação, temperada por exigências didáticas. Assim, estes ingredientes não devem ser esquecidos, ou menosprezados, quando se analisa uma seqüência de ensino.

Ao se lidar com esses três aspectos pode-se fazer com que o novo conteúdo fique “ensinável” que, como veremos, é o grande critério para se nortear uma Transposição Didática. Porém, não podendo esquecer-se do saber sábio como objeto de referência, fonte de normatividade e fundamento de legitimidade (CHEVALLARD, 1991).

As simplificações existem no processo de Transposição Didática. Ou seja, muitas vezes é necessário limitar a profundidade conceitual e as linguagens empregadas em algumas situações. Um dos motivos que justificam essa simplificação é decorrente, por exemplo, da carga horária. As escolhas e adaptações são as únicas saídas quando deve-se fazer caber três ou quatro séculos de Física em duas ou três aulas semanais ao longo de três anos.

Com isso, é inevitável que surjam sérios dilemas no momento de fazer as adaptações necessárias para levar o que é produzido pela ciência para a sala de aula.

Uma forma possível de se resolver esses dilemas é tomar uma posição em relação àquilo que se vai ensinar. Devido à quantidade de tempo, de aulas disponíveis e da necessidade e atualidade que um determinado conhecimento científico tem durante esse período, pode-se optar por manter uma maior proximidade com aquilo que é feito no contexto da ciência. Assim, mantém-se o saber mais perto de sua gênese, de seu nicho epistemológico original. Entretanto, corre-se o risco de torná-lo inacessível para a maioria dos alunos.

Também pode-se optar por parar de buscar essa proximidade com o ponto de vista da ciência e assumir que o compromisso do ensino é com o contexto

educacional. Porém, agora corre-se o risco de se descaracterizar o saber científico, tornando-o totalmente desnecessário.

Na verdade, o que se tem realmente é um posicionamento intermediário, uma amálgama, um terceiro caminho. Tenta-se fazer com que o Saber a Ensinar tenha uma forte relação com o Saber Sábido, mas que ainda assim não se perca de vista seu poder de cobertura educativo. As relações Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS), por exemplo, são partes de uma discussão que não têm correlato na maior parte da comunidade científica. O “Físico de verdade” não pensa nestas relações no momento da pesquisa, porém elas se encontram na física da sala de aula, pois é um tema de suma importância para a educação.

E quais são os riscos desta terceira via? Uma administração equivocada de todas as especificidades que cada um dos nichos epistemológicos possui pode tornar os saberes totalmente descaracterizados. Neste posicionamento “mixado” não é difícil tornar os saberes inadequados ou inviáveis temporalmente.

Desta forma, analisar a evolução do saber que se encontra na sala de aula através da Transposição Didática possibilita uma fundamentação teórica para uma prática pedagógica mais reflexiva e questionadora. Para Chevallard, isso equivale à capacidade, e necessidade constante, do professor exercer uma vigilância epistemológica em seu magistério. A Transposição Didática é para o professor

[...]uma ferramenta que permite recapacitar, tomar distância, interrogar as evidências, pôr em questão as idéias simples, desprender-se da familiaridade enganosa de seu objeto de estudo. Em uma palavra, é o que lhe permite exercer sua vigilância epistemológica. (CHEVALLARD, 1991, p.16)

Por exemplo, cumprir todo o programa quer dizer, realmente, “empurrar” muita matéria em pouquíssimo tempo. Hoje, nas escolas, se tem duas aulas de física por semana (às vezes somente uma!), porém continua-se trabalhando com os livros didáticos, divididos em três volumes, que foram produzidos em um outro contexto, totalmente diferente do em que onde havia cerca de 5 aulas semanais. Isso exige demais do aluno, não possibilitando a ele o tempo necessário para a digestão daquilo que lhe foi “empurrado goela abaixo”. Essa forma de agressão intelectual torna o saber totalmente inadequado.

Acreditamos que essa discussão é de extrema importância, pois se deve ter a clara noção de que é necessário todo o tempo negociar e administrar todos esses

riscos. A Transposição Didática vem mostrar que é impossível criar uma forma de ensino com risco zero. E isso não é uma questão de que o professor não tem vontade ou não está se empenhando em fazer um bom ensino, tampouco ele deve ficar passivo perante o sistema que trava suas tentativas de inovação. O que o professor deve realmente perceber é que

[...] o reconhecimento da transposição didática supõe romper sua participação harmoniosa no funcionamento didático. O sistema didático não é efeito de nossa vontade. (CHEVALLARD, 1991, p.16)

Deve-se ter em mente que não se possui uma solução que não traga riscos. Assim, é necessário que se busque minimizá-los, criando formas de ensinar que integrem os diversos interesses presentes no contexto educacional: verossimilhança com os resultados da ciência, a formação para a cidadania, o prazer de conhecer, entre outros. Como professores, recebemos os ecos de anseios diferentes, sejam profissionais, de formações ou individuais. São interesses e expectativas múltiplas, às vezes conflitantes entre si, que permeiam todo o tempo o Sistema de Ensino ao qual pertencemos.

Hoje mais que ontem, esse sistema deve suportar o peso das expectativas, os fantasmas, as exigências de toda uma sociedade para quem a educação é a última reserva de sonhos sob a qual desejaríamos poder exigir-lhe tudo. (CHEVALLARD, 1991, p.13)

É justamente em função deste contexto que se deve avaliar, negociar e calcular esses riscos. Quando se debruça sobre os objetos de ensino com um olhar mais profundo vê-se que há uma trama complexa, um emaranhado de idéias, descobertas, fatos históricos, tudo deslocado de seus ambientes originais, formando uma grande colcha de retalhos. Pode-se ter uma bela e grande colcha e a Transposição Didática traz importantes informações para se entender porque um aluno ainda sente frio quando se cobre com ela.

Sem dúvida nenhuma, a Transposição Didática é um fenômeno presente no processo ensino-aprendizagem. Negá-la ou ignorá-la é aceitar que os conteúdos científicos contidos nos livros textos, são uma reprodução fiel da produção científica. Ter consciência da Transposição Didática, bem como do papel das práticas sociais de referência, é de suma importância para o professor que pretende desenvolver um ensino mais contextualizado e com conteúdos menos fragmentados do que aqueles dos livros textos. Isso possibilitaria uma reconstituição, pelo menos parcial, de um ambiente que

permita ao aluno a compreensão da capacidade que tem o saber de resolver problemas reais. Também abre caminho para a compreensão de que a produção científica é uma construção humana, portanto, dinâmica e passível de equívocos, mas que, ao mesmo tempo, tem um grande poder de solução de problemas. (ALVES-FILHO, 2000, p.233)

Tendo em vista tudo o que mostramos, podemos responder às perguntas que inicialmente fizemos. A Transposição Didática revela que a forma de apresentação dos conteúdos em Física não é natural, e sim fruto de escolhas. Não é neutra, pois nasce de um alinhamento epistemológico vigente, carregado de uma concepção de ciências. Possui uma ordenação lógica (hierarquia conceitual). Não é historicamente verdadeira, pois seqüencia e aproxima conceitos e eventos distantes no tempo.

Com isso, é possível revelar todos esses aspectos do saber escolar que, geralmente, são desconsiderados. Acreditamos, assim, que estas reflexões são imprescindíveis para se realizar uma Transposição Didática de elementos de Física Quântica para o Ensino Médio.

3.3 – Anatomia da Transposição Didática

Chevallard mostra que a forma como se relaciona o saber ensinado e o saber sábio é um dos pontos mais fundamentais de questionamento em toda a didática. Assim, o conceito de Transposição Didática é um elemento para entender a dinâmica em torno da passagem do Saber Sábio ao Saber Ensinado.

Estas relações ocorrem em um ambiente que configura um contexto escolar, o Sistema Didático. Para Chevallard

os sistemas didáticos são formações que aparecem a cada ano[...]: em volta de um saber (designado ordinariamente pelo programa) se forma um contrato didático que toma esse saber como objeto de um projeto compartilhado de ensino e aprendizagem e que une em um mesmo ambiente docentes e alunos. (CHEVALLARD, 1991, p.26)

Este é um pequeno universo que se encontra dentro de um ambiente externo, o Sistema de Ensino.

O Sistema de Ensino é tido como “algo” mais amplo, por exemplo enquanto a escola representa o Sistema Didático, o Sistema de Ensino seria representado pelas escolas e o sistema educacional de um país.

O entorno imediato de um sistema didático está constituído inicialmente pelo sistema de ensino, que reúne o conjunto de sistemas didáticos e tem ao seu lado um conjunto diversificado de dispositivos estruturais que permitem o funcionamento didático e que intervêm nos diversos níveis. (CHEVALLARD, 1991, p.27)

Sendo assim, ele acaba sempre por influenciar o Sistema Didático.

O Sistema de Ensino também se encontra inserido em um contexto ainda mais amplo e complexo. “*O sistema de ensino [...] possui por sua vez um entorno, que podemos denominar, se desejarmos, a sociedade, [...]*”. (CHEVALLARD, 1991, p.27)

A mediação entre a sociedade e o sistema de ensino é realizada pela noosfera, que posteriormente veremos com mais detalhes. Inicialmente pode-se considerá-la como o ambiente onde

se encontram todos aqueles que, tanto ocupam os postos principais do funcionamento didático, se enfrentam com os problemas que surgem do

encontro da sociedade e suas exigências; ali se desenvolvem os conflitos; ali se levam a cabo as negociações; ali se amadurecem as soluções. (CHEVALLARD, 1991, p.28)

Chevallard ilustra todos esses entornos da seguinte forma:

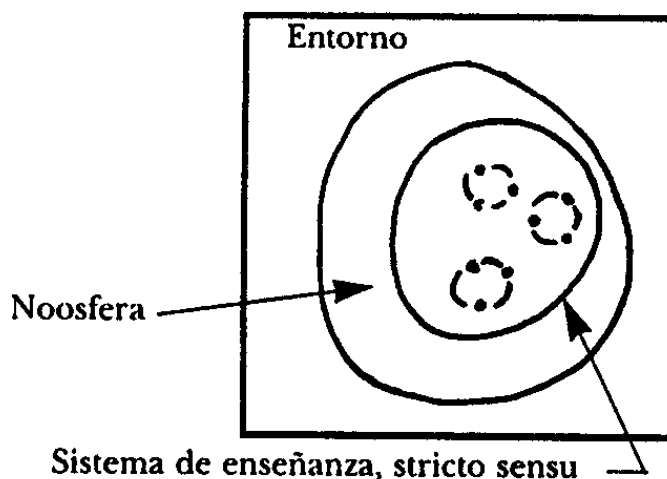


Figura 1 – Os entornos e a Noosfera (CHEVALLARD, 1991, p.28)

O Sistema de Ensino sempre foi pensado, na pedagogia tradicional, como binário: composto pelo professor e o aluno. Como era um sistema que continha apenas seres humanos, analisar suas relações tornava-se algo extremamente complexo e ficavam sujeitos somente aos estudos de natureza sociológica. Desta forma, as falhas e imperfeições humanas eram refletidas no ensino de maneira que os conflitos ali existentes passavam a serem vistos como algo inerente a esse tipo de relações. Porém, para Chevallard, o pensamento e construção do objeto de ensino se configuram sobre uma base ternária. Ou seja, essa manufatura do saber escolar acontece numa relação contendo três elementos: o professor, o aluno e o saber.

[...]a demasiado famosa “relação professor-aluno” tem obscurecido, durante ao menos duas décadas, o estudo dos feitos didáticos mais imediatamente transparentes. Esquema polêmico que funciona retificando um erro mantido por demasiado tempo. (CHEVALLARD, 1991, p.15)

Essa visão da dinâmica entre a escola e alunos ratificava a idéia de que

[...] o sistema educacional, inteiramente cheio de vontade humana, poderia moldar-se segundo a forma de nossos desejos, dos quais não seria senão uma projeção, na matéria inerte de uma instituição. (CHEVALLARD, 1991, p.13)

Porém, para Chevallard, o pensamento e construção do objeto de ensino se configuram tendo como base um sistema ternário. Ou seja, essa manufatura do saber escolar acontece numa relação contendo três elementos, três unidades: o professor, o aluno e o saber ensinado.

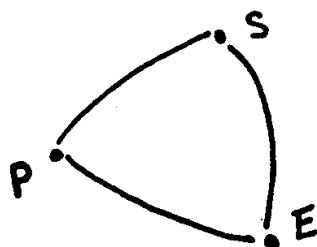


Figura 2 – Relação Professor-Aluno-Saber (CHEVALLARD, 1991, p.26)

[...] uma vez que se torna possível falar desse terceiro termo, tão curiosamente esquecido: o saber, pode formular-se uma pergunta que concede à polêmica seu verdadeiro interesse: O que é então aquilo que, no sistema didático, se coloca sob o estandarte de O Saber? O “saber ensinado” que concretamente encontra o observador, que relação entabula com o que se proclama dele fora desse âmbito? E que relação entabula então com o “saber sábio”, o dos matemáticos? Quais distâncias existem entre um e outro? (CHEVALLARD, 1991, p.15)

Chevallard mostra que para realmente se compreender as relações que ocorrem dentro do sistema de ensino e, assim livrar-se do voluntarismo daqueles que o influenciam e compõem, dever-se-ia incluir o saber como elemento fundamental nesse processo. Ao incluir o saber na dinâmica do processo de ensino tem-se um elemento mais objetivo de análise. Ao se compreender as alterações sofridas pelo saber desde sua criação na comunidade científica até sua chegada nas salas de aula tem-se em mãos um bom instrumento para avaliar os impactos que este causa nos alunos. Assim, acredita-se ser mais capaz de dar significado a esses conhecimentos apresentados nas escolas.

3.3.1 – *Noosfera, a eminência parda*

Conforme já exposto anteriormente, em sua análise, Chevallard define três esferas ou patamares de saber: Saber Sábio, Saber a Ensinar e Saber Ensinado. Cada uma destas esferas tem seus agentes pertencentes a diferentes grupos sociais, com interesses distintos e que, com regras próprias, influenciam nas mudanças sofridas pelo saber ao longo de seu percurso epistemológico. Porém, ao longo da trajetória sofrida pelo saber (do ambiente científico até à sala de aula) existem fatores externos ao sistema escolar, inseridos em um ambiente mais amplo, onde todas as três esferas coexistem e se influenciam. Nem tudo que chega deste ambiente externo tem reflexo na sala de aula. Os agentes reguladores, determinantes para a seleção e, principalmente, para as modificações que o Saber Sábio sofrerá, são os componentes dos bastidores de todas as mudanças. A essa esfera social de influência, Chevallard nomeia de **noosfera**.

[...] estamos aqui na esfera onde se pensa – segundo modalidades talvez muito diferentes – o funcionamento didático. Para essa instância sugeri o nome paródico de noosfera. Na noosfera, os representantes do sistema de ensino, com ou sem mandato (desde o presidente de uma associação de professores até o simples professor militante), se encontram, direta ou indiretamente, [...], com os representantes da sociedade (os pais dos alunos, os especialistas da disciplina que militam em torno de seu ensino, os emissários do órgão político). (CHEVALLARD, 1991, p.28)

Nela encontram-se todos aqueles que, de uma forma ou de outra, influenciam nos rumos do ensino, modificando o saber sábio até sua transformação em Saber Ensinado. A noosfera é o ambiente onde as três esferas se interligam e é composta por membros da sociedade. Assim, vê-se com clareza a interação dos saberes com essa sociedade.

A noosfera é tida como a esfera em que se pensa o funcionamento do sistema didático, assim como sua execução. Ela é composta por cientistas, educadores, professores, políticos, autores de livros didáticos, pais de alunos, entre outros.

Cada esfera dos saberes possui seus próprios grupos de integrantes da noosfera, podendo haver ou não uma sobreposição entre os grupos de esferas diferentes. O conhecimento das instituições também influencia a transposição didática. Logo, além de definir quais temas constarão nos currículos temos, geralmente, uma

prescrição de como o professor deverá tratar estes temas e realizar sua prática, como podemos ver nos PCNEM:

A Ótica e o Eletromagnetismo [...] poderiam [...] ser o espaço adequado para a introdução e discussão de modelos microscópicos. A natureza ondulatória e quântica da luz e sua interação com os meios materiais, assim como os modelos de absorção e emissão de energia pelos átomos, são alguns exemplos que também abrem espaço para uma abordagem quântica da estrutura da matéria, em que possam ser modelados os semicondutores e outros dispositivos eletrônicos contemporâneos [...]. A possibilidade de um efetivo aprendizado de Cosmologia depende do desenvolvimento da teoria da gravitação, assim como de noções sobre a constituição elementar da matéria e energética estelar. Essas e outras necessárias atualizações dos conteúdos apontam para uma ênfase à Física contemporânea ao longo de todo o curso, em cada tópico, como desdobramento de outros conhecimentos e não necessariamente como um tópico a mais no fim do curso [...] (BRASIL, 1999, p.234)

Com isso, pode-se criar tanto um fator propulsor quanto limitador de inovações e de questionamentos.

Todo esse trabalho de mudança e adequação é executado por pessoas que estão, na teoria da Transposição Didática, personificados na figura da noosfera. A noosfera age orientando a forma como o sistema funciona. Em momentos de normalidade, ela pode ser pensada realmente como uma eminência parda, ou seja, como um indivíduo com muita influência na vida política ou em outra atividade qualquer, mas que permanece anônimo, que não se mostra nem age claramente. O cardeal que sussurra nos ouvidos do rei, ditando-lhes “conselhos”, mas que nunca se revela. Porém, ela ganha visibilidade em tempos de crise, em momentos de confrontação entre necessidades sociais e funcionamento da escola. Ela atua e trabalha na busca de soluções para esses problemas. De qualquer modo, deve-se deixar claro que ela se faz presente em todos os momentos, mesmo naqueles mais tranquilos, sem conflitos ou crise, porém de maneira mais discreta, menos ostensiva.

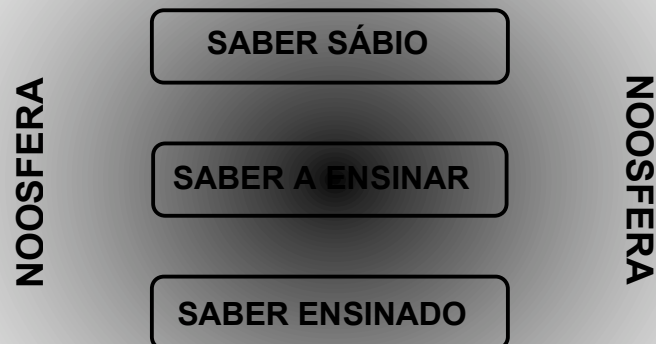
A noosfera atua como um mediador entre duas instâncias importantes, que são as necessidades e anseios da sociedade e o funcionamento do sistema escolar.

Exige-se hoje que a escola seja capaz de formar cidadãos críticos, atuantes, plenamente capazes de tomar decisões e fazer escolhas. Mas, do ponto de vista da escola, como se faz isso? Certamente não é uma tarefa fácil, material e teoricamente.

Quem tentará ajustar a realidade da escola com as necessidades sociais é justamente a noosfera, por meio de supervisores, secretários de educação, todos os integrantes governamentais envolvidos com a área, editores de livros didáticos etc.

Esse jogo com o saber que é transportado e modificado entre as três esferas (a do Saber Sábido, a do Saber a Ensinar e a do Saber Ensinado) é mediado pela noosfera, com seus diferentes personagens que atuam durante todo o processo. Pode-se, então, dizer que

A noosfera é o centro operacional do processo de transposição, que traduzirá nos fatos a resposta ao desequilíbrio criado e comprovado (expresso pelos matemáticos, pelos pais, pelos professores mesmos). Ali se produz todo conflito entre sistema e entorno e ali encontra seu lugar privilegiado de expressão. Neste sentido, a noosfera desempenha um papel de obstáculo. (CHEVALLARD, 1991, p.34).



3.3.2 – As esferas do Saber

Aqui serão apresentadas, com mais profundidade, cada uma das esferas de saber propostas por Chevallard, bem como os membros da noosfera que participam de cada um destes domínios.

i – O Saber Sábio

Para um conhecimento científico figurar dentre aqueles apresentados aos alunos é necessário que ele possua um balizador, uma fonte de referência produzida pela comunidade científica. O Saber Sábio é, então, aquele produzido pela comunidade científica e que aparece em revistas especializadas, congressos ou periódicos científicos. Este tipo de saber nasce da produção e trabalho de cientistas e intelectuais que, mesmo possuindo diferenças idiossincráticas ou diferentes visões de Ciências, fazem parte de uma mesma comunidade de pesquisa, com perfil epistemológico bem definido.

Trata-se, assim, de um saber que é desenvolvido por cientistas nos institutos de pesquisas, e que passa pelo julgamento da comunidade científica, com sua legislação e regras próprias. Por isso, o Saber Sábio possui especificidades intrínsecas deste ambiente em que ele é gerado.

ii – O Saber a Ensinar

Ao ser transposto para o ambiente escolar, o Saber Sábio transforma-se em um outro tipo de saber, passando a integrar novas demandas e ajustando-se a elas. Para Alves-Filho

[...] uma das principais funções da escola é a transmissão dos conhecimentos produzidos pela humanidade. Para que haja esta transmissão, é necessário que o conhecimento seja apresentado de maneira que possa ser aprendido pelos alunos. É neste ponto que se manifesta uma das principais transformações do conhecimento, isto é, a diferença entre o conhecimento produzido e o conhecimento oferecido ao aprendiz. (ALVES-FILHO, 2000, p.218)

Este saber deverá estar revestido de uma forma didática visando sua apresentação aos alunos. O Saber a Ensinar é, então, o saber que aparece nos programas, livros didáticos e materiais instrucionais.

A esfera do Saber a Ensinar tem uma composição extremamente diversificada. Esta heterogeneidade pode ser uma fonte de conflitos, visto que seus membros lutam sempre em defesa de seus interesses, que nem sempre estão em sintonia entre si. Podemos considerar como integrantes desta esfera os autores de livros didáticos e divulgação científica, os professores, os especialistas de cada área, todo o staff governamental envolvido com educação e ciências e, até mesmo, a opinião pública. Para Alves-Filho,

Os cientistas e intelectuais, mesmo não pertencendo a esta esfera de poder, também influenciam de maneira indireta, mas significativa, as decisões relativas ao “saber” que será processado e transformado. Aliás, estes grupos não só determinam as transformações, mas também o que do saber sábio deve ser alvo de transformações. A pressão exercida por esses grupos pretende melhorar o ensino e a aprendizagem. (ALVES-FILHO, 2000, p.226)

iii – O Saber Ensinado

A seqüência de apresentação de conteúdos que é registrada no plano de aula do professor não coincide necessariamente com aquela prevista nos programas ou livros didáticos. Isso indica que quando o professor efetivamente insere em suas aulas o Saber a Ensinar, ele produz o Saber Ensinado.

O fato de o saber a ensinar estar definido em um programa escolar ou em um livro texto não significa que ele seja apresentado aos alunos desta maneira. Assim identifica-se uma segunda Transposição Didática, que transforma o saber a ensinar em “saber ensinado”. (ALVES-FILHO, 2000, p.220)

Nessa esfera há, portanto, a predominância de uma preocupação didática, pois agora a finalidade desta transposição está voltada para o trabalho do professor em sua prática diária. Então o Saber Ensinado é aquele que figura nos apontamentos dos professores, em seus planos de aula e nos materiais de apoio que ele mesmo prepara e, finalmente, nas aulas que ministra. Para Ofugi, a *“didática entra nessa relação como uma forma de otimizar as conexões do aluno, frente às informações que se deseja repassar”*. (OFUGI, 2001)

Na esfera do Saber Ensinado, todos os membros convivem em um mesmo ambiente que é a própria instituição escolar. Com isso, os grupos da noosfera são preponderantemente da comunidade escolar. Fazem parte destes grupos os proprietários de estabelecimentos de ensino, os supervisores e orientadores educacionais, a comunidade dos pais e os professores. Assim, o

professor, desde o instante em que monta suas aulas, tem que fazer a mediação entre os interesses dos membros desta esfera e os fins didáticos de sua prática.

É ainda neste momento, que as pressões externas levam o Professor, a processar uma nova Transposição Didática, produzindo um novo saber. Neste novo saber, é mais evidente a interferência das concepções pessoais do Professor, dos interesses e opiniões da administração escolar, dos alunos e da comunidade em geral. A interação entre os personagens desta esfera é extremamente próxima e intensa, propiciando, de maneira mais clara, a repercussão das opiniões dos grupos, nas definições e nas modificações refletidas no saber ensinado. Em outras palavras, desenvolveu-se um terceiro nicho epistemológico cujas diretrizes de sua dinâmica, se comparadas com as epistemologias associadas ao saber sábio e ao saber a ensinar, são muito mais instáveis e mutáveis. (ALVES-FILHO, 2000, p. 231)

Tem-se aqui, então, o desenvolvimento de uma epistemologia própria ao ambiente escolar. Assim, a produção do saber ensinado evidencia os obstáculos e desafios da construção de uma metodologia de ensino que não pode ser dissociada da questão dos valores e anseios da sociedade, do próprio objeto de ensino, e nem dos aspectos e objetivos próprios da aprendizagem.

Pode parecer, à primeira vista, que o Saber Ensinado é uma deturpação do Saber Sábio. Porém, a Transposição Didática revela, através de sua análise, que

Para que o ensino de um determinado elemento de saber seja meramente possível, esse elemento deverá ter sofrido certas deformações, que o tornaram apto para ser ensinado. O saber-tal-como-é-ensinado, o saber ensinado, é necessariamente distinto do saber-inicialmente-designado-como-o-que-deve-ser-ensinado, o saber a ensinar. Este é o terrível segredo que o conceito de transposição didática põe em perigo. (CHEVALLARD, 1991, p.16)

O conteúdo deste “segredo” pode realmente incomodar ao ser revelado, pois:

O saber ensinado deve **aparecer** conforme o saber a ensinar. Ou melhor, a questão de sua adequação, não deve ser formulada. (CHEVALLARD, 1991, p.17 grifo nosso)

Porém, é justamente a capacidade de se questionar esta adequação que fornecerá indícios de como efetuar a atualização curricular.

Acreditamos que ao se trabalhar com tópicos de Física Moderna no Ensino médio (que são temas que exercem um grande poder de sedução nos alunos) deve-se estar atento com os fatos expostos pela Transposição Didática, na tentativa de uma inserção efetiva destes temas. O desejo intenso de propiciar um ensino diferente do atual, mais desafiador, interessante e motivacional, através da inclusão desta parte da Física, pode fazer com que surja um deslumbramento que impossibilitaria de ver os problemas reais para se fazer esta inserção. Por mais duro que seja

[...] devemos em princípio abster-nos de ensinar temas, incluindo os “interessantes” (desde o ponto de vista do professor), para os quais não se disporia (ou não todavia) de uma transposição didática satisfatória. Essa consideração se faz expressa na fina observação que citamos, pertencente a sir Richard Livingstone (The future of Education, 1941): “Se reconhece o bom mestre pelo número de temas valiosos que se abstém de ensinar”. (CHEVALLARD, 1991, p.54)

Talvez a falta de se encarar de uma maneira diferente, como a que é proposta por Chevallard e sua Transposição Didática, o papel dos saberes no processo do ensino possa ser o indicativo de uma das causas do fracasso do ensino da FMC no Ensino Médio ao longo das últimas duas décadas.

3.4 – O processo da transposição

Acreditar na Transposição Didática implica aceitar a existência de todo um processo de transformação sofrido pelos saberes ao serem transpostos para um outro contexto que não o de sua gênese. Será agora detalhado como se processam essas modificações e suas implicações educacionais.

Um conteúdo de saber que tenha sido designado como saber a ensinar, sofre [...] um conjunto de transformações adaptativas que vão torná-lo apto para ocupar um lugar entre os objetos de ensino. O “trabalho” que transforma um objeto de saber a ensinar em um objeto de ensino, é denominado a transposição didática. (CHEVALLARD, 1991, p.45)

No entanto, o processo de transformação do saber existe no interior da produção da atividade científica, ou seja, ele já começa na esfera do Saber Sábio. Isso porque há uma diferença entre o momento da produção de um saber e o momento em que este se torna público. Esta primeira modificação sofrida pelo saber decorre da necessidade que os cientistas têm de utilizar uma lógica de exposição de resultados, e de ter de seguir regras rígidas para publicar seus trabalhos aos membros da comunidade científica da qual fazem parte. Todas as publicações devem estar de acordo com um conjunto de normas estabelecidas dentro deste ambiente acadêmico e estas regras diferem daquelas utilizadas por eles durante a construção do saber.

Reichenbach (1961) distingue dois diferentes momentos no processo de construção dos saberes. O primeiro momento, chamado de “Contexto da Descoberta”, é aquele no qual os cientistas buscam a solução de um problema, ou seja, quando ele efetivamente constrói um conhecimento. O segundo momento, denominado de “Contexto da Justificação”, é estabelecido quando o cientista já encontrou a resposta que procurava e, então, necessita apresentá-la a seus pares para que ela passe pelo julgamento da comunidade que poderá, ou não, validá-la.

No “Contexto da Descoberta”, o cientista utiliza as mais variadas formas de buscar solucionar seus problemas. Ele faz isso de maneira pouco sistemática prevalecendo a intuição, a imaginação, etc. Entender esse contexto implica adentrar a psicologia da descoberta.

Após chegar à solução desejada, ele necessita apresentar a resposta que construiu a seus pares, para que ela possa, então, ser analisada e julgada. Assim, o “Contexto da Justificação” é o momento em que o fruto do trabalho realizado pelo

cientista se transforma em um artigo a ser publicado nas revistas científicas especializadas em sua área.

A elaboração destes textos deve seguir as regras tácitas estabelecidas pela comunidade científica e, assim, o saber passa por sua primeira modificação: a **despersonalização**. Ou seja, o texto deve ser escrito de forma totalmente impessoal, anulando o sujeito da pesquisa, juntamente com seus conflitos, dúvidas e todo o processo informal que porventura o auxiliou na construção de sua resposta. Nos artigos de Einstein, por exemplo, publicados em 1905, não aparecem em nenhum momento a relevância e importância dada por ele ao papel da imaginação presente na sua construção das Teorias da Relatividade. Tampouco aparecem nos trabalhos de Planck, publicados na *Annalen der Physik*, de 1901, seus conflitos pessoais ao inserir a constante h na explicação da radiação do corpo negro. Isso ele o fez somente ao amigo R. W. Wood:

Foi um ato de desespero. Durante seis anos fiquei lutando com a teoria dos corpos negros. Era preciso que eu descobrisse uma explicação teórica a qualquer preço que não fosse a inviolabilidade das duas leis da termodinâmica. (Armin Hermann, *The Genesis of Quantum Theory*, 1971). (SEGRÈ, 1982)

Assim, aparece neste momento um processo de reformulação, uma reconstrução racional, que apaga qualquer traço emotivo ou idiossincrático, buscando valorizar ao máximo as conexões lógicas e racionais bem como a neutralidade de sentimentos, de forma a não parecer vinculado aos indivíduos, mas de valor universal. Isso complementa a caracterização do processo de **despersonalização**.

Além de ser apresentado de maneira impessoal, o saber, quando divulgado para a aceitação da comunidade científica, deve assumir um caráter universal, ou seja, o cientista elimina as condições contextuais de sua pesquisa e, assim, busca atingir níveis mais amplos de abstração e universalidade. Temos aqui a **descontextualização**. Isso ocorre pois os resultados obtidos em uma pesquisa científica devem ser possíveis de serem aplicados a outros problemas, e não apenas àqueles que o originaram. Com isso, é necessário o desaparecimento de todo o contexto da pesquisa, bem como de sua história.

Um novo conhecimento pode ser julgado e validado somente após passar por essas transformações. A partir do momento em que é, então, aceito pela comunidade científica ele está apto a fazer parte da esfera do Saber Sábio.

Porém, nem todos os saberes pertencentes à esfera do Saber Sábio comporão os programas escolares. Mas, aqueles que irão entrar nas salas de aula e fazer parte dos currículos e livros didáticos passarão por um outro conjunto de transformações.

Ao ser aceito, qualquer saber presente no domínio do Saber Sábio encontra-se despersonalizado e descontextualizado. Esta descontextualização cria um outro encadeamento lógico para que este conhecimento seja apresentado de forma organizada. Com isso, criam-se vínculos que não existiam anteriormente e quebram-se antigas ligações, produzindo a **dessincretização**, isto é, há uma perda do contexto problemático, epistemológico, ao qual a pesquisa se vincula. Desse modo, coisas que estavam em sintonia, que estavam ligadas, ficam agora desligadas, fora de sintonia.

Por exemplo, alguns autores de livros didáticos preferem apresentar primeiro campo, depois a força coulombiana. São conceitos que estão extremamente afastados no tempo e pertencentes a contextos epistemológicos diferentes. Somente os aproximam para fins didáticos.

Ao fazer parte do Saber a Ensinar, vê-se que os conteúdos são **recontextualizados** na tentativa de relacioná-los a situações mais significativas para o aluno. Assim, este contexto reconstituído é impossível de ser idêntico àquele em que o saber foi originado, pois, os ambientes escolares e científicos possuem diferentes realidades e, principalmente, objetivos distintos.

Os processos de despersonalização, dessincretização e de descontextualização, aos quais o saber é submetido, faz (sic) 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. (ALVES-FILHO, 2000, p.227)

Após desconstruído, o saber é reconstruído, ganhando outras nuances, outras características. Em sua origem, um saber faz parte de uma estrutura conceitual própria, de maneira que a própria estrutura cria as relações entre esse e outros saberes, seja na mesma área ou em áreas diferentes. Ao ser transposto para o Saber a Ensinar, cria-se uma outra rede epistemológica para esse saber, de modo que ele agora precisa ser reagrupado e apresentado nos livros didáticos e programas curriculares de maneira organizada e harmoniosa. Esse processo de reestruturação do saber é chamado de **textualização**. (CHEVALLARD, 1991)

Quando um conceito do Saber Sábio é reescrito, textualizado, para fazer parte do Saber a Ensinar, há ainda um outro processo de transposição que Astolfi (1995) chama de dogmatização. A origem desse processo pode ser a tendência dos cientistas de valorizarem a experimentação e a observação no ato da produção do conhecimento. Uma das conseqüências da dogmatização é a manutenção de produtos e a exclusão dos processos. Sem contar, que os saberes são tratados como dados, são apresentados como verdades da natureza, e não como uma construção humana de conhecimentos.

As diferentes formas de se reestruturar esse saber originam as diferentes seqüências didáticas que encontramos nos livros.

A nova organização deste saber, agora fragmentado, é ditada em função de uma hierarquia conceitual. Dos pontos de vista cognitivo e epistemológico, o conceito de velocidade se forma anteriormente aos conceitos de espaço e tempo. Porém, parece mais lógico apresentá-los na ordem contrária. Devido a essa hierarquia conceitual começa-se, então, ensinando espaço, depois o tempo, para então apresentar o conceito de velocidade.

Essa forma de re-organização parece permitir uma progressão conceitual. Primeiro apresenta-se as variáveis fundamentais para depois ir além. Vive-se, então, em uma eterna reconstrução do saber. Como num processo de retroalimentação, desmonta-se o saber para, depois, remontá-lo.

Ao ocorrer a descontextualização do saber em relação ao domínio sábio, o domínio de referência, fica claro que aquilo que é feito no ensino de Física, tanto na sala de aula quanto no livro texto, já está extraído de seu contexto científico, ou seja, não é mais aquilo que está na Física como ciência.

Esta descontextualização pode parecer, à primeira vista, como algo ruim, prejudicial ao saber. Porém, longe de juízo de valores, a Transposição Didática indica um processo inevitável de exílio contextual do saber científico.

A escola, na verdade, nunca ensinou saberes em estado “puro”, mas conteúdos de ensino que resultam de cruzamentos complexos entre uma lógica conceitual, um projeto de formação e algumas exigências didáticas. Deste ponto de vista, as transformações sofridas na escola pelo saber sábio devem ser interpretadas menos em termos de degradação e mais em termos de necessidade constitutiva. (OFUGI, 2001, p.78)

3.5 – A sobrevivência dos saberes

Até aqui, foi mostrado que a Transposição Didática funciona como uma ferramenta de análise capaz de evidenciar o trajeto do saber de seu ambiente de origem até a chegada à sala de aula. Nem todos os conteúdos do Saber Sábio farão parte do cotidiano escolar. O papel da noosfera na seleção dos saberes é imprescindível, e devem ser levados em conta os múltiplos fatores de influência destas escolhas. Fatores esses que vão desde interesses políticos e comerciais, passando pelos anseios de uma sociedade que acredita na escola, até os interesses pedagógicos inerentes ao magistério e à docência.

O principal objetivo da noosfera é a otimização do ensino, buscando uma forma eficiente de conduzir o processo de ensino e aprendizagem. Sendo assim, a Transposição Didática também fornece indícios de características relevantes para que um determinado saber esteja presente nos livros didáticos e salas de aula. Em outras palavras, a Transposição Didática mostra quais as características que um Saber a Ensinar deve possuir.

Chevallard define algumas dessas características:

A primeira dela consiste em afirmar que para o Saber Sábio se transformar em Saber a Ensinar ele deve ser **Consensual**. Ao se ensinar Física professores, pais e alunos não devem ter dúvida se aquilo que é ensinado está correto ou não. Assim, este conteúdo deve ter, pelo menos neste momento, um status de “verdade”, histórica ou de atualidade. *“O sistema de ensino parece não saber como avaliar aquilo que o aluno deve saber daquilo que a ciência ainda não sabe”*. (CHEVALLARD, 1991, p.69)

Isso indica o porquê de temas mais antigos e tradicionais serem preferidos àqueles ditos de fronteira. No Ensino de Física isso pode ser relacionado ao fato de temas de Astrofísica e Cosmologia, como evolução estelar e Big Bang, poderem até aparecer nos livros didáticos por uma imposição editorial, mas poucos professores tratam de tais assuntos em suas aulas. Contrariamente, cinemática, estática e conteúdos de mecânica clássica em geral são amplamente abordados nas aulas de Física.

Um Saber Sábio, para ser transposto deve estar de acordo com dois “tipos” de **atualidade**:

i) Atualidade moral:

O saber deve estar adequado ao ambiente, à sociedade. A atualidade moral diz respeito a um tipo de conhecimento que possa ser avaliado como importante pela sociedade e necessário à composição curricular. Caso ocorra uma inadequação desse saber, corre-se o risco de a sociedade não o ver como necessário nas escolas. Os pais, por exemplo, podem questionar para que a escola ensina determinado tema se seu filho pode, eventualmente, aprender sozinho ou noutro lugar. Deve-se ficar claro que a questão aqui é de pertinência e não de valoração per si.

ii) Atualidade biológica:

O saber deve possuir uma atualidade em relação à ciência praticada. Assim, ensinar ondas eletromagnéticas utilizando-se o éter como suporte material ou termologia usando o calórico como fluido térmico, exceto em uma perspectiva histórica, configura-se como uma inadequação biológica. O mesmo aconteceria se se ensinasse Física Atômica utilizando o modelo de Thomson, Rutherford ou mesmo o modelo de Bohr. Estes seriam conhecimentos inadequados, pois se constituem em modelos ultrapassados.

Outra característica importante nesse contexto é a **Operacionalidade**:

O Saber a Ensinar deve ser **Operacional**. Um saber que é capaz de gerar exercícios, produzir atividades e tarefas que possibilitem uma avaliação objetiva tem grandes chances de ser transposto. Conteúdos que não conseguem gerar atividades possíveis de serem avaliadas estão fadados a não serem transpostos. Uma seqüência didática considerada boa, (com conteúdos e atividades tidas como interessantes) porém não “operacionalizável” não será adequada à gestão do cotidiano escolar, pois não se consegue fazer os estudantes “trabalharem” com ela.

Esta característica é extremamente importante, pois é necessário que o professor seja capaz de ensinar, de fazer os alunos trabalharem, transformar um determinado conteúdo em uma seqüência coerente de, no mínimo, algumas aulas. Fatalmente, tem-se a necessidade de se avaliar tudo isso. Caso não se possa criar

um tipo de avaliação, corre-se o risco de o aluno considerar aquele conteúdo sem importância e, assim, desistir de disponibilizar esforços para aprendê-lo.

No processo de transposição deve haver **Criatividade didática**:

Um Saber Sábio deve permitir que haja uma **Criatividade Didática**, para que seja transposto para o contexto escolar. Isso implica a criação de um saber com identidade própria do contexto escolar. Existem muitas atividades e áreas de estudo que são produzidas para o ensino, mas que não têm equivalente na área de pesquisa, como por exemplo, os exercícios de associação de resistores em circuitos elétricos, as transformações de escalas termométricas, os vasos comunicantes etc.

Em situações como essas, cria-se uma situação de ensino que guarda alguma relação com o conhecimento da dimensão sábia, mas na verdade trata-se de um objeto com “identidade didática”. Ele “existe” somente no contexto do ensino, configurando-se assim como fruto de uma criatividade didática.

A criatividade didática permite, por exemplo, a confecção de uma série de exercícios. Assim, na escola, ensina-se eletricidade de uma forma muito mais próxima da que faz um engenheiro do que faz um físico. E isso ocorre pois esse tipo de tratamento é consensual, operacionalizável e avaliável.

A Cinemática em geral, ensinada na escola, pode ser vista sob esse ponto de vista. Fruto de uma criatividade didática enorme, é resultante de um longo e bem sucedido processo de transposição didática, incorpora aspectos valorizados no processo de ensino: é consensual; possui uma alta operacionalidade e capacidade de avaliação, de forma que há um maior investimento em atividades de ensino na escola quando se trata deste tema.

O objetivo da criatividade didática é gerar uma série de atividades, variantes, de forma que esse conhecimento se estabeleça, apesar de não ter proximidade tão grande com seu contexto original. Este objeto de ensino não foi retirado do contexto do Saber Sábio, mas realmente criado. Ainda assim consegue-se criar situações em que ele se multiplica e se adapta ao Sistema Didático.

O Saber a Ensinar deve também se submeter aos testes *in loco*, adquirindo por assim dizer um “selo de qualidade”. Isso é definido por Chevallard como **Terapêutica**:

Existe uma peça fundamental para a sobrevivência dos saberes: os resultados obtidos com sua aplicação em sala de aula. A “experiência”, em termos de uma avaliação, a posteriori e coletiva da área envolvida é fundamental para a manutenção (ou não) dos saberes introduzidos no domínio do ensino. Desse ponto de vista, o conjunto de saberes-a-ensinar presente nos programas escolares é, em determinado momento histórico, a somatória dos sucessos alcançados pela área no processo de transposição. Em poucas palavras, o que dá certo, dentro das características que ressaltamos, se mantém na escola, o que dá errado acaba saindo.

3.6 – As Regras da Transposição Didática

Astolfi (1997) elaborou cinco regras que deveriam ser observadas durante o processo de Transposição Didática, que têm uma ligação direta com as características apresentadas acima. Essas regras permitem melhor descrever a dinâmica de transformação do saber e acabam por complementar a idéia original da sobrevivência dos saberes. Essas regras são:

Regra I. Modernizar o saber escolar.

Os novos saberes que surgem no âmbito das pesquisas científicas e que são utilizados pelas indústrias e novas tecnologias são passíveis de estar contidos nos livros didáticos, criando uma aproximação da produção acadêmica com o que é apresentado na escola.

Em diferentes disciplinas, parece ser necessário aos especialistas “colocar em dia” os conteúdos de ensino para aproximá-los dos conhecimentos acadêmicos. Neste caso, freqüentemente criam-se comissões que tomam por base vários trabalhos e proposições anteriores difundidos na noosfera. (ASTOLFI, 1997)

Segundo Alves-Filho:

A introdução de tópicos como “código de barras, funcionamento de um CD, termômetros óticos, fotocopidora...”, por exemplo, são os indicativos de uma modernização do saber a ensinar. (ALVES-FILHO, 2000, p.235).

A modernização dos saberes escolares é uma necessidade, pois legitima o programa da disciplina, garantindo seu lugar no currículo.

Regra II. Atualizar o saber a ensinar.

Para esta renovação, julgada necessária do lado do saber sábio, se soma uma necessidade de renovação curricular do lado do ambiente do sistema educativo. (ASTOLFI, 1997)

Ao fazer a revisão de um livro didático deve-se ir além de apenas acrescentar novos saberes. Há a necessidade de se eliminar alguns saberes que, embora corretos, devem ser descartados por estarem demais banalizados.

Alguns objetos do saber, com o passar do tempo, se agregam à cultura geral que, de certa forma, passa a dispensar o formalismo escolar. Outros perdem o

significado por razões extracurriculares e/ou escolares.[...] Regra que poderia ser entendida como a “luta contra obsolescência didática”. (ALVES-FILHO, 2000, p.236).

Ou seja, a instrução formal pretendida no Sistema de Ensino deve se limitar àquela que não se encontra diluída na cultura da sociedade.

Regra III. Articular o saber “novo” com o “antigo”.

Entre os vários «objetos» do saber sábio suscetível a modernização e para diminuir à obsolescência, alguns são escolhidos porque permitem uma articulação mais satisfatória entre o «novo» que se tenta introduzir, e o «velho» já provado no sistema e do qual será necessário conservar alguns elementos reorganizados. (ASTOLFI, 1997)

A introdução de novos saberes deve ser feita de forma articulada com outros saberes já alojados nos programas de ensino. Um exemplo dessa articulação do novo com o velho é a introdução do eletromagnetismo sem a negação da eletrostática e da magnetostática. Nos livros e programas de Física, tanto no Ensino Médio como em nível universitário básico, os capítulos destinados ao eletromagnetismo aparecem posteriormente ao estudo da interação entre cargas paradas e das propriedades magnéticas da matéria. O mesmo acontece com a introdução do conceito de campo elétrico em articulação historicamente anacrônica e epistemologicamente incorreta com a força coulombiana. Assim, essa articulação é fundamental já que

A negação radical de um dado conteúdo gera sentimento de desconfiança, de dispensável, de prescindível por parte do estudante, fazendo-o evitar esforços no seu aprendizado. (ALVES-FILHO, 2000, p.237)

Regra IV. Transformar um saber em exercícios e problemas.

A seleção vai ocorrer a partir da facilidade particular de certos conteúdos para gerar um número grande de exercícios ou atividades didáticas, até mesmo quando estes são nitidamente descontextualizados quanto a sua função, em relação ao conceito original. (ASTOLFI, 1997)

O Saber Sábio capaz de gerar uma ampla variedade de exercícios e atividades didáticas tem uma maior chance de ser transposto e se tornar Saber a Ensinar. Esta é uma das regras mais importantes para a presença e manutenção de um saber na sala de aula. A operacionalidade é um atributo essencial pois garante a gestão do cotidiano escolar. Segundo Alves-Filho:

Certamente esta é a regra que reflete o maior grau de importância no processo transformador do saber, ao criar uma ligação muito estreita com o processo de avaliação. A organização do saber a ensinar, nos livros textos, é oferecida pela Transposição Didática em um ordenamento crescente de dificuldade – tecnicamente denominado pré-requisitos. A aquisição e domínio deste saber, por parte do estudante, deve ser confirmada pela sua habilidade na solução de exercícios e problemas, cuja resposta envolve um resultado numérico do tipo “certo ou errado”. (ALVES-FILHO, 2000, p.238)

Regra V. Tornar um conceito mais compreensível.

Um conceito [...] é visto como capaz de diminuir as dificuldades conhecidas como as que os alunos se encontram. [...] A “coisa” do professor é um texto do saber. É então ao texto do saber que ele devolve a etiologia (ciência das causas) o fracasso e, por conseguinte, será nas variações do texto do saber que irá encontrar uma arma terapêutica para as dificuldades encontradas. Podemos aqui medir o caminho do que vai da primeira justificação que introduz o conceito, tal qual como aparece nas instruções, ao interesse que leva conscientemente o professor (diferentes daquele do programa) este mesmo conceito. (CHEVALLARD e JOHSUA, 1982).

A Transposição Didática deve permitir a aprendizagem de conceitos, caso contrário, ela não pode ser legitimada. Sobre esse ponto, é fundamental que os papéis de professor e aluno possam ser efetivamente cumpridos, resumidamente indicando que ao professor cabe ensinar e ao aluno aprender. Com isso, é necessário que haja uma tentativa de minimizar as dificuldades de aprendizagem, o que exige uma série de preocupações.

Muitos dos objetos do saber sábio se apresentam em uma linguagem ou jargão próprios dos cientistas e intelectuais, pois estão relacionados ou são construídos a partir de outros objetos mais sofisticados. O saber a ensinar, desenvolve uma linguagem própria, compatível com o nível de entendimento do estudante. Neste processo são criados objetos didáticos que permitem inserir elementos novos e facilitadores do aprendizado, assim como utilizar uma matemática adequada para aqueles que estão sendo iniciados neste tipo de saber. (ALVES-FILHO, 2000, p.238)

Apresentamos as regras de seleção e alguns critérios de escolha do saber que ficará presente nos materiais didáticos e salas de aula. Em geral, o conhecimento que fica tem essas características: é consensual e atual, é fruto de uma criatividade didática, de maior ou menor grau, e passa pela questão terapêutica, pois foi aplicado e deu minimamente certo.

Não há aqui um sentido de valoração, de bom ou ruim. Dar certo significa que se adaptou bem ao novo ambiente no qual foi inserido. O mesmo ocorre com a terapêutica, é uma questão de adaptabilidade do que é produzido ao Sistema de Ensino. A definição de valores é uma meta-questão, indo muito além do que diz a Transposição Didática. São opções. O que encaminha a produção dessa ou daquela atividade? O que se acha do projeto educacional e por onde se tem que ir? Com a busca de respostas a tais questionamentos a valoração pode nortear a construção das atividades.

A partir da exposição acima, pode-se avaliar que a Transposição Didática fornece critérios mínimos para se entender a produção e sobrevivência de saberes no Sistema Didático. A partir dela é possível explicar, em parte, porque em disciplinas com longa tradição, como a Física, os programas se mantêm pouco modificados ao longo de décadas, ou talvez séculos! O “velho” sobreviveu às vicissitudes da sala de aula: produziu atividades capazes de serem realizadas pelos alunos; pôde ser avaliado pelos professores, e a terapêutica confere-lhe a confiança necessária para permanecer. Por outro lado, as necessidades de atualização e modernização dos saberes concorrem no sentido de promover mudanças que, no entanto, acabam por raramente ocorrer. Isso porque nas ciências em geral, e na Física em particular, tais necessidades muitas vezes são relativizadas em face de dificuldades internas ao próprio conhecimento, tais como:

1º) Aproximações: a mecânica newtoniana não é estritamente “moderna”, nos termos acima mencionados, tendo sido suplantada pela relatividade einsteiniana. Porém tem um grau de precisão elevado quando aplicada ao cotidiano, onde as velocidades dos corpos são pequenas quando comparadas à da luz.

2º) Hermeticidade: pela sua estruturação conceitual, abstração e formulação em linguagem matemática, os conhecimentos presentes nas ciências físicas são poucos assimiláveis pela cultura popular. Ou seja, mesmo conteúdos extremamente “velhos”, como a cinemática, ainda hoje não fazem parte do senso comum dos indivíduos do século XXI.

A renovação curricular é muito menor justamente pela maior dificuldade em se produzir atividades e seqüências que dêem certo. Por isso, continua-se ensinando cinemática. A idéia de Chevallard liberta o professor, no sentido que coloca o saber em uma posição mais relevante no processo da transposição. Assim, não se trata apenas de uma questão de má vontade do professor, de descaso, conformismo ou falta de desejo de inovar. Para se trocar um saber, como a cinemática, é necessário colocar algo equivalente em operacionalidade em seu lugar. Assim, procuram-se substitutos dentro do próprio Sistema Didático, recorrendo ainda a conhecimentos “velhos”, deixando de fora os conteúdos atuais.

Deve-se, mais uma vez, deixar claro que a Transposição Didática é uma ferramenta de análise. Ela só permite dizer como o processo de inclusão de saberes no ambiente escolar se dá, e não diz se o que se tem é um bom ou mau ensino.

4. A metodologia da pesquisa

4.1 – Metodologia

Durante a definição de nosso objeto de estudo, deparamo-nos com diferenças significativas entre as várias metodologias de pesquisa disponíveis na literatura. Cada metodologia traz especificidades relativas às diferentes perguntas que buscam responder e às soluções que visam encontrar. O presente trabalho ainda apresenta outras dificuldades que vão além daquelas inerentes ao ensino de Física Moderna.

Como exposto no primeiro capítulo, a imensa maioria das pesquisas acerca da inserção destes temas no Ensino Médio, ao longo dos anos, giraram em torno das justificativas desta introdução. Infelizmente, em comparação ao volume de pesquisas em Ensino de Física, pouco se pesquisou sobre o ensino e a aprendizagem desses tópicos na realidade das escolas médias brasileiras, o que restringe de forma significativa os resultados que poderiam servir de referência e suporte para nossa pesquisa. Assim, como o cerne deste trabalho é a produção de uma seqüência didática com atividades e materiais próprios, que possibilitem a introdução de elementos fundamentais de Física Quântica no Ensino Médio, centramos o foco no “como fazer” e não no “porque fazer”. Foi uma árdua tarefa a escolha de uma metodologia de pesquisa adequada para delinear as respostas necessárias às nossas questões e, principalmente, que fosse suficientemente apropriada para validar os resultados obtidos com a seqüência didática criada, a fim de que esta possa ser replicada, de modo satisfatório, em outras situações, por outros professores.

Foge do escopo deste trabalho avançarmos no estudo realizado acerca de metodologias de pesquisa. Sendo assim, como pode ser visto em Gonçalves:

Já que não existe uma única metodologia de pesquisa adequada ao estudo da vasta gama dos fenômenos educacionais, é natural que cada investigador realize seu esforço pessoal na busca de uma forma de pesquisar que seja adequada ao seu objeto de estudo e às suas próprias convicções, à sua visão de Ciências e até mesmo à sua formação acadêmica. (GONÇALVES, 1997, p.105).

A metodologia de pesquisa deve ter uma estrutura apropriada para a compreensão do que está sendo estudado, levando-se em conta uma amálgama de fatores que se influenciam mutuamente durante o ato de educar.

Desde a década de 80, é comum a tentativa de se situar as pesquisas em Educação entre dois paradigmas opostos: as pesquisas quantitativas e as qualitativas. Os referenciais quantitativos, que têm suas origens no prestígio e sucesso dos métodos das ciências físicas do século XIX, buscam a produção de situações de contornos bem definidos para que se possa fazer uma correlação entre variáveis. As pesquisas de cunho qualitativo, originadas em uma reação crítica à aplicação dos métodos positivistas às ciências sociais e humanas, preocupam-se principalmente com o significado subjetivo dos participantes do estudo. Como define Firestone (1987)

[...] A pesquisa quantitativa procura explicar as causas de mudanças em fatos sociais, primordialmente através da medição objetiva e análise quantitativa, enquanto a qualitativa se preocupa mais com a compreensão do fenômeno social, segundo as perspectivas dos atores, através da participação na vida desses atores [...] O pesquisador quantitativo ideal é “desprendido” para evitar viés, enquanto o pesquisador qualitativo é “imerso” no fenômeno de interesse. (FIRESTONE *apud* MOREIRA, 1990, p.29)

Causa de tensões entre pesquisadores em Educação, esta dicotomia tem origens históricas e filosóficas profundas, iniciadas no século XIX a partir do problema da unidade das ciências. Do início do século passado até idos dos anos 70, inspirado na sociologia de Auguste Comte, os objetos sociais deveriam ser tratados como os objetos físicos, sendo a ciência considerada uma atividade neutra. A partir dos anos 60, esta analogia com os objetos físicos começa a ser criticada na Alemanha, sob a influência do idealismo de Kant. Assim, cresce um debate epistemológico a partir das idéias de filósofos como Popper, Kuhn e os trabalhos de Piaget *“para reagir contra a ênfase positivista tradicional sobre os métodos quantitativos e enfatizaram a importância crítica de métodos alternativos de pesquisa”* (DE LANDSHEERE, 1988, p.15)

Não faz sentido aprofundarmos em um estudo teórico acerca da distinção e pertinência destes dois tipos antagônicos, porém complementares, de pesquisa educacional. Nossa adesão a um determinado tipo de pesquisa não implica que a consideramos melhor, tão pouco sugere descrédito na abordagem excluída. Acreditamos, no entanto, ser mais significativo fazermos uso de um estudo qualitativo do ato de ensinar, visto que *“[...] a pesquisa qualitativa tem como ponto de partida a complexidade”*. (GONÇALVES, 1997, p.107), que foi, então, o fator determinante para a escolha deste método. Um trabalho de Erickson (1998) corrobora nossa escolha quando diz que:

Os objetivos essenciais da pesquisa qualitativa são detalhar a condução de eventos diários e identificar o significado que estes eventos têm para aqueles que participam deles e para quem os presenciam.[...] A pesquisa qualitativa em educação é especialmente apropriada quando se deseja: informações detalhadas sobre implementação; identificar nuances do entendimento subjetivo que motiva vários participantes. (ERICKSON, 1998, p.1155)

Por se tratar de características complexas de serem avaliadas, não raro a validação dos resultados obtidos em uma pesquisa qualitativa, é questionada. Porém, há disponível uma vasta literatura que aborda o problema da validade dos resultados obtidos por pesquisas qualitativas (COHEN E MANION, 1980 MOREIRA, 1990; BECKER, 1993; ALTHEIDE E JONHSON, 1994; ERICKSON, 1998). A melhor maneira encontrada para se buscar uma saída para tratar o problema da validação é *“multiplicar as referências disponíveis e procurar uma diversidade de rigores, cada uma adaptada ao seu objeto específico”* (ASTOLFI, 1997, p.5).

Cohen e Manion (1980) determinam uma série de estratégias de triangulação de dados que auxiliam na corroboração de resultados encontrados em uma pesquisa qualitativa. Optamos pela chamada Triangulação Metodológica, que é representada pela diversidade de instrumentos de pesquisa e dos registros no momento de construir os dados, consistindo, assim, na utilização de diferentes métodos de estudo em um mesmo objeto de pesquisa.

Desta forma, a Transposição Didática, como apresentada no terceiro capítulo, é, então, o referencial teórico que sustenta nossa investigação. Com o auxílio desta ferramenta de análise, investigaremos as atividades elaboradas, bem como a sequência de ensino como um todo, procurando também averiguar a possibilidade de esta ser um meio de adentrar o mundo da Física Moderna e Contemporânea. Assim, as regras da Transposição Didática serão as balizadoras de nosso trabalho.

É de suma importância a análise geral do curso e sua relação com os outros processos de ensino vivenciados pelos alunos, pois

Não podemos pensar em uma nova Didática das Ciências introduzindo somente inovações pontuais, restritas a um só aspecto. Um modelo de ensino – um modelo que responda à questão: “como ensinar?” – deve ter coerência interna, já que cada atividade de ensino deve apoiar-se nas restantes de tal forma que constitua num corpo de conhecimento que integre os distintos aspectos relativos ao ensino e à aprendizagem das ciências. (CARVALHO, 2004, p. 7)

Como desejamos que esta investigação possa ser replicada em outras escolas, com outros professores, procuramos avançar um pouco mais em outras questões. Nosso principal objeto de estudo é o saber, mas o foco da pesquisa também necessita ser desviado para o próprio processo de ensino-aprendizagem em que os alunos e professor estiveram inseridos. Chevallard elabora toda sua teoria a partir de uma tríade, formada pelo saber – aluno – professor, porém, centraliza a discussão nos processos de transformação sofridos pelo saber. A aprendizagem, parte fundamental do processo educacional, não é contemplada em seu trabalho.

Com isso, um outro aspecto de nossa pesquisa diz respeito à aprendizagem e, principalmente, à relação do aluno com um conteúdo tão diferente do habitual. O processo educacional não possui fronteiras bem determinadas, visto que é fruto de uma complexidade intrínseca da interação entre o ser humano e o conhecimento. Esta interação possui elementos diversos e indissociáveis. Da mesma maneira, é impossível dissociar o pesquisador de seu objeto de pesquisa. Segundo Chalmers, *“não se pode manter uma distinção acentuada entre a observação e a teoria porque a observação ou, antes, as afirmações resultantes da observação são permeadas pela teoria.”* (CHALMERS, 2001, p.62).

Entretanto, deve ficar claro que o aspecto da aprendizagem em nosso trabalho foi abordado apenas para levantar importantes questões do cotidiano de nossas escolas, de forma que sejam capazes de fomentar outras pesquisas para que o ensino de Física Moderna avance de maneira efetiva e se torne uma realidade. Sendo assim, mesmo não sendo alvo de nossa investigação, as reflexões acerca da aprendizagem perpassaram todo o processo de criação do curso, exercendo sempre um papel determinante em nossas escolhas.

4.2 – O papel da professora

Muito se tem discutido sobre a necessidade de se mudar a prática docente tradicional, mas poucos materiais trazem propostas claras, objetivas e práticas para os professores. Estes, em geral, têm pouco (ou quase nenhum) tempo para se dedicar ao estudo de teorias pedagógicas e, além disso, encontram grande dificuldade em aplicá-las de fato. Os resultados de pesquisas educacionais, muitas vezes, acabam permanecendo longe da escola, sem ocasião de serem avaliados na prática. Segundo Carvalho:

Nenhuma mudança educativa formal tem possibilidades de sucesso se não conseguir assegurar a participação ativa do professor, ou seja, se, de sua parte, não houver vontade deliberada de aceitação e aplicação dessas novas propostas de ensino. (CARVALHO, 2004, p. 8)

A formação de grupos de pesquisa envolvendo universidade e escola auxilia a superação de um obstáculo institucional que tem dificultado a efetiva transposição de resultados de pesquisas educacionais para a sala de aula. Optamos por isso que o curso fosse aplicado por uma professora que trabalha há anos na escola pública lecionando Física para o Ensino Médio.

Embora a professora seja bacharel e licenciada em Física, durante toda a aplicação do curso, no ano de 2004, ela recebeu instrução e acompanhamento pedagógico dos pesquisadores da universidade. Isso se deveu ao fato de que, por se tratar de uma nova proposta de ensino envolvendo elementos de Física Quântica, Epistemologia e Filosofia da Ciência, era necessário o estudo contínuo destes temas para que fossem tratados de maneira profunda em sala de aula, visto que tais conteúdos geralmente são pouco discutidos mesmo em cursos de formação inicial de professores.

A professora participante desta pesquisa pertence ao grupo que se constituiu a partir de um projeto de pesquisa anterior a este trabalho (“Melhoria da qualidade do ensino de termodinâmica, no Ensino Médio de escolas públicas estaduais”: FAPESP 98/1078-1) que envolveu docente e pós-graduandos da Faculdade de Educação da USP e docentes de escolas públicas do Estado. Por um lado, como professores de Ensino Médio, estávamos insatisfeitos com os resultados obtidos em nossos cursos: alunos com dificuldades, que não entendiam o conteúdo ensinado, que não o relacionavam com seu dia a dia, que procuravam apenas descobrir qual fórmula usar para resolver os problemas propostos. Buscávamos um modo de atingir melhores

resultados em relação à aprendizagem. Por outro lado, como pesquisadores da Universidade, percebíamos a dificuldade de transformar efetivamente a Física do Ensino Médio através de nossas pesquisas.

O grupo que ainda hoje faz parte de um outro projeto de pesquisa fomentado pela FAPESP, surgiu da necessidade ressentida de enfrentar o recorrente problema concernindo a introdução, no ensino básico, das modernas teorias físicas produzidas ao longo do século XX. A experiência positiva na colaboração entre pesquisadores da Faculdade de Educação e professores do Ensino Médio permitiu a constituição de um grupo coeso, capacitado a abarcar a complexidade dos processos presentes na sala de aula. Pesquisar o universo escolar de seu interior (professores-pesquisadores) e de seu exterior (pesquisadores-universitários) aumenta as chances de sucesso, quando este é visto em termos melhoria do ensino na sala de aula.

O grupo atual é formado por dois pesquisadores universitários, cinco professores da rede pública e um aluno de mestrado. Mesmo participando das discussões, fornecendo grandes contribuições para a preparação dos materiais e atividades, a pesquisa presente nesta dissertação é efetivamente realizada por apenas um dos professores, sendo que os outros aplicam uma seqüência didática diferente da que será apresentada neste trabalho.

4.3 – A coleta dos dados

A coleta de dados foi efetuada em uma escola estadual do Ensino Médio, localizada em um bairro de classe média situado na zona sul da cidade de São Paulo.

As aulas, ministradas no laboratório de Física da escola, eram “geminadas”, e ocorreram no período matutino e tinham duração de cinquenta minutos cada, com o intervalo de vinte minutos entre elas. Como o curso analisado neste trabalho foi elaborado com a intenção de ser efetivamente aplicado nas condições reais de uma escola pública brasileira, decidimos implementá-lo no decorrer de todo o ano letivo de 2004, tornando-o assim o cerne do planejamento anual da professora, ao invés de ter sua aplicação restrita a um curso extra, fora do período normal das aulas.

A turma escolhida para a realização da pesquisa cursava o terceiro ano do Ensino Médio e era constituída por 41 alunos matriculados, sendo a média de presença oscilante, variando entre 30 e 32 alunos.

Para a coleta de dados, fizemos uso de três instrumentos de investigação: análise documental; um questionário aplicado ao final do curso e o registro das aulas em vídeo.

Os documentos e o questionário:

Para a análise documental consideramos documentos *“quaisquer materiais escritos que possam ser usados como fonte de informação sobre o comportamento humano.”* (PHILLIPS, 1974, p.187 apud LÜDKE e ANDRÉ, 1986, p.38). Assim, utilizamos os trabalhos escritos pelos alunos, individualmente ou em grupo, bem como as provas e exercícios efetuados por eles. A possibilidade de todo esse material ser continuamente revisado, bem como analisado por outros pesquisadores, confere uma maior segurança às conclusões que chegarmos.

O questionário foi utilizado para resgatar o que fora vivenciado pelos alunos durante a aplicação do curso, na tentativa de levantar indícios sobre o que sentiram durante as aulas e suas impressões subjetivas dos temas abordados.

As gravações em vídeo:

Julgamos essencial registrar todas as etapas da seqüência didática para que pudéssemos, a partir da reação dos alunos ao material apresentado, construir

significados e integrar as conclusões que chegarmos ao analisá-la sob o prisma da Transposição Didática.

Esta escolha não implica a crença em uma neutralidade da gravação em vídeo. O pesquisador não está livre de fazer uma interpretação equivocada dos eventos ocorridos. Porém, para Gonçalves:

Além de amenizar o trabalho do pesquisador num primeiro momento a gravação em vídeo ajuda a refutar a freqüente crítica feita à observação, pelo caráter extremamente pessoal da interpretação que o investigador realiza, tendendo a obter uma visão distorcida ou parcial dos fatos em função do seu envolvimento intenso com o fenômeno em estudo. (GONÇALVES, 1997, p.114)

Com os registros gravados, sempre haverá condição de se verificar, e até mesmo identificar, possíveis parcialidades ou interpretações tendenciosas. Há também a possibilidade de outros pesquisadores, ao assistirem ao vídeo, refutarem ou ratificarem as conclusões obtidas na investigação, conferindo a ela mais fidedignidade.

A câmera era mantida em um ponto da sala, de maneira que fosse possível fazer tomada geral das aulas e dos alunos, e era operada pelo próprio pesquisador. Não foi possível a gravação de um único grupo, visto que, devido a oscilação da freqüência dos alunos, a professora da turma optou por formações espontâneas a cada atividade.

A partir de respostas encontradas nas provas e do grau de participação durante as aulas, alguns alunos foram selecionados e passaram, ao final do curso, por uma entrevista semi-estruturada gravada em áudio. Esta entrevista tem a finalidade de nos informar como os alunos se sentiram em relação às características mais distintas deste curso se comparadas ao ensino que tradicionalmente recebem.

Como nossa pesquisa é voltada para a análise da seqüência didática que elaboramos e seus objetos de ensino, todo o material escrito pelos alunos, bem como suas falas, apresentadas no capítulo destinado à análise dos dados, têm a finalidade de ilustrar nossas considerações acerca do curso. Por não objetivarmos analisar a evolução temporal dos alunos ou o desempenho da professora, optamos por não seguir a maneira usual de transcrição de dados gravados em vídeo. Ao invés de explicitarmos os turnos, apresentando uma transcrição completa do ocorrido nas

aulas, selecionamos as passagens mais relevantes, vinculadas às regras da Transposição Didática que estarão sendo utilizadas naquele determinado momento.

Neste trabalho utilizaremos a seguinte notação para apresentar os dados:

I₁(q)²

Onde I denota o instrumento pelo qual o dado foi retirado. O índice 1 diferencia instrumentos equivalentes utilizados em momentos distintos. O caractere entre parênteses indica o número da questão daquele instrumento, seguido de um algarismo que tem por finalidade apenas diferenciar os alunos.

Os instrumentos podem ser:

A – Fala dos alunos durante as aulas.

E – Trechos retirados de exercícios escritos, propostos ao longo das aulas.

P – Respostas para questões encontradas nas provas.

Q – Respostas para questões encontradas no questionário final.

EF – Respostas retiradas da entrevista final.

É preciso ressaltar que nossa pesquisa deve ser encarada como composta de duas partes. A própria construção do curso foi um processo de produção dentro do contexto da pesquisa, numa espécie de pesquisa participativa, visto que o curso era remodelado de acordo com seu andamento. Ainda que iluminados pelo referencial teórico, estávamos todo o tempo reavaliando o curso através das discussões, das reações dos alunos e das exigências do próprio conteúdo. Com isso, a elaboração desta sequência didática foi um processo “artesanal”. Há, posteriormente, uma segunda parte da pesquisa, o momento em que investigamos, de fato, como se deu a Transposição Didática.

Assim, a pesquisa encontra-se na dimensão do Saber a Ensinar (como propor o curso) e na dimensão do Saber Ensinado (o que de fato ocorreu).

Vale ressaltar ainda que a análise da aprendizagem dos conceitos quânticos não foi o foco deste trabalho. Mesmo ciente de que não há ensino sem aprendizagem (CARVALHO, 2004) foi preciso que este aspecto do curso não viesse a ser

investigado nesta pesquisa, vez que seria uma outra variável a ser investigada e não possuíamos tempo suficiente para dispensar-lhe a atenção devida. Assim, foi necessário que se fizesse este recorte, visto que as pesquisas que buscam compreender as nuances envolvidas no processo de ensino e aprendizagem esbarram em complexidades que inviabilizam sua realização no período de tempo estipulado para um mestrado.

5. A nova estrutura do Saber

5.1 – Reconstrução dos Saberes

Inicialmente o conhecimento está contido na esfera do Saber Sábio, ambiente onde os físicos constroem os saberes e onde convivem teorias, experimentos e pesquisas. De acordo com Robilotta, *“um dos aspectos mais importantes de uma teoria física é que ela constitui-se num saber altamente estruturado”* (ROBILOTTA, 1987, p.10). Sendo assim, a maioria dos conceitos construídos é entendida, explicada e faz sentido somente dentro destas estruturas criadas pelos cientistas.

Desta forma, a maneira como se relacionam os elementos conceituais dentro de uma estrutura influi de maneira decisiva no processo de ensino. Robilotta e Babichak trazem uma interessante reflexão para clarear o papel fundamental da compreensão, por parte dos educadores, acerca das relações entre os constituintes de uma estrutura: Ao apresentar a figura abaixo os autores questionam: “o que significa o desenho da figura 3?”

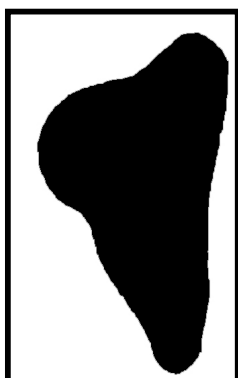


Figura 3



Figura 4

A resposta não é simples. Talvez recorramos aos nossos sentidos para explicá-la, dizendo: “É uma mancha escura, em forma triangular, desenhada em um papel branco.” Mas isso não é dar o significado de coisa alguma. [...] este tipo de resposta não é satisfatório. Nós não conseguimos dar o significado da mancha escura porque seu significado não está nela mesma. Quando inserimos a mancha escura num desenho maior, como na figura 4, o seu

significado aparece. Ele está no contexto. As partes determinam o todo e o todo explica as partes. E este tipo de relação vale, também, para os conceitos físicos. Por exemplo, na eletrostática, o conceito de carga pode ser análogo à mancha escura da figura 3 e a eletrostática, mostrada na figura 4, ao cãozinho. (ROBILOTTA e BABICHAK, 1997, p.40).

Como foi visto no capítulo 3, de acordo com a Transposição Didática, a introdução do Saber Sábio nas salas de aula é feita somente através da construção de uma nova estrutura para esse saber, visto que ele agora se encontra desalojado de seu “habitat natural”. Ao se criar uma nova estrutura, fatalmente esse “novo” elemento necessitará de uma caracterização diferente da anterior. Isso decorre do fato de que o conhecimento foi retirado de seu contexto original e colocado em outro, com objetivos, motivações, compromissos e interesses, totalmente diferentes.

Este conhecimento passa, então, a não ser idêntico ao que lhe deu origem, apesar de ainda ser possível reconhecer nele algumas de suas características originais. Nesse sentido, o fóton tratado no Ensino Médio nunca será, exatamente, o conceito equivalente ao fóton na perspectiva da ciência, nem tampouco a onda eletromagnética ou qualquer objeto quântico.

Logo, quando se produz atividades de ensino, quando se constrói uma seqüência didática ou durante a confecção de um programa curricular, cria-se uma certa organicidade, manifestada por uma coerência interna. Esse processo é decorrente da quebra da estrutura original dos conceitos e da necessidade de se substituí-la por outra. Contudo, a reconstrução não pode ser feita de maneira aleatória, sendo necessário encontrar a melhor forma de se reconstruir estruturas, pois “*o significado de um conceito é dado pelas linhas que o interligam a outros conceitos, dentro de uma dada estrutura.*” (ROBILOTTA e BABICHAK, 1997, p.41)

No momento desta re-construção didática, o maior problema a ser enfrentado é a busca por uma coerência pedagógica, sem que se exceda, ou se careça do rigor científico. Porém, temos que

A grande dificuldade [...] é que o conhecimento físico é estruturado de modo auto-consistente, o que faz com que ele seja inteligível em seus próprios termos. Por isso, conduzir um estudante que está fora da estrutura para dentro dela é um processo altamente complexo, que demanda do professor uma razoável compreensão de como a ciência se desenvolve e evolui. (ROBILOTTA, 1987, p. 15)

O que deve, então, ser buscado é uma sobreposição das características dos conceitos que estão presentes nas duas estruturas, ou seja, na estrutura original (Ciência) e na estrutura modificada (Ciência Escolar).

Sendo Assim, a tarefa de transpor a Teoria Quântica para a sala de aula do Ensino Médio deve ser vista como uma das mais complexas, pois de um lado têm-se as exigências epistemológicas inerentes ao campo de conhecimento produzido pela Física Moderna, muito distantes dos padrões de entendimento forjados no mundo cotidiano. Por outro lado, as exigências do domínio escolar não são menores, pois ideologia, necessidades de natureza didática e tradição se entrelaçam na constituição de um domínio particular.

Tem-se de fato um problema complexo e com solução não óbvia: como satisfazer a ambos os domínios? Será possível manter o rigor conceitual e ao mesmo tempo satisfazer as exigências do sistema didático?

5.2 – A escolha dos Saberes e o processo de confecção do curso de introdução aos conceitos de Física Moderna

Mostrar aos alunos como a física apreende a realidade, como discutido no primeiro capítulo, foi o principal objetivo do curso analisado neste trabalho. Esta característica do conhecimento físico foi o que nos motivou e originou sua criação. Nossa intenção era a de introduzir alguns conceitos da Física Quântica a partir de uma sequência didática que permitisse apresentar aos estudantes a dualidade onda-partícula, revelando assim as características estranhas e deslumbrantes acerca da natureza da luz.

Com isso, desejávamos que os alunos pudessem ter um entendimento, mesmo que pequeno, sobre os problemas físico/epistemológicos enfrentados pela Teoria Quântica. Acreditamos fortemente que a formação dos estudantes do Ensino Médio deve contemplar, mesmo que em pequena dose, um vislumbre do acesso a essa ferramenta intelectual construída pelo homem para prospectar e compreender o mundo microscópico. Dessa forma é possível apresentar aos alunos a nova visão de mundo trazida pela Física construída no século passado. Estimulados e conduzidos por um embate de idéias, cremos que os alunos podem, então, realmente perceber as diferenças e rupturas trazidas por esta nova forma de descrever e entender a realidade física.

Conscientes do grande obstáculo trazido pelo formalismo matemático que estrutura a Física Quântica, optamos por dar ênfase ao estudo qualitativo do tema. Porém, é inegável a dificuldade em traduzir os conceitos e princípios, gerados e apoiados por uma ferramenta matemática extremamente sofisticada, para uma linguagem não-formalizada. Assim, nossa primeira grande preocupação foi a de contornar esse obstáculo sem, no entanto, criar um curso com um caráter meramente informativo. Tal receio permeou todo o processo de criação, bem como a implementação do curso. Desta maneira, buscamos apoio e inspiração nas pesquisas apresentadas na área de ensino e nos livros didáticos.

5.3 – Algumas propostas de introdução de FMC no Ensino Básico

Como exposto no primeiro capítulo desta dissertação, mesmo que de forma consensual e com um considerável crescimento nas últimas décadas, pouquíssimas são as pesquisas em Ensino de Ciências que trazem propostas de inserção das teorias modernas no Ensino Médio que foram, de fato, testadas em sala de aula. Nossa constatação, após uma extensa pesquisa bibliográfica (Capítulo I), é corroborada por Greca e Moreira (2001), Ostermann e Moreira (2000) e Ostermann e Ricci (2004). Em um dos trabalhos encontramos a seguinte afirmação:

é possível perceber que ainda predomina, na literatura, a simples apresentação de tópicos de FMC. No entanto, questões de ensino vêm sendo incorporadas aos trabalhos e, talvez, seja uma tendência em crescimento.[...] é preciso investir na possibilidade de introduzir alguns destes tópicos no ensino médio, verificando resultados da aprendizagem em condições reais de sala de aula. (OSTERMANN E MOREIRA, 2002, p.16)

Apesar da carência de pesquisas voltadas para a introdução efetiva dos conteúdos modernos na sala de aula, fizemos uso de alguns trabalhos acadêmicos realizados na área para auxiliar a construção do curso. A quase totalidade destes trabalhos é de origem européia ou americana. Não temos dúvidas que estas pesquisas são de grande utilidade, revelando problemas ao se enfrentar o desafio de ensinar teorias modernas, indicando caminhos a serem seguidos ou, simplesmente, servindo como fontes de inspiração. Contudo, é preciso ressaltar de forma contundente a falta de vínculos que tais pesquisas possam vir a ter com a realidade das escolas brasileiras, com as dificuldades enfrentadas pelos professores e, em especial, quanto ao aporte conceitual de nossos alunos. Uma rápida reflexão acerca destes trabalhos mostra suas limitações e, acima de tudo, suas inadequações ao cotidiano das escolas do Brasil, em particular as escolas públicas.

Pode-se, por exemplo, constatar esta inadequação ao ler o trabalho dos alemães Müller e Wiesner (2002), da Universidade de Munique. Neste artigo eles apresentam um curso introdutório de Mecânica Quântica para o *German Gymnasium*, que seria o nível correspondente ao Ensino Médio brasileiro. Trata-se de uma excelente pesquisa contemplando a construção de um bem estruturado e inovador curso. Este foi implementado, testado em sala de aula e teve seus resultados da aprendizagem divulgados. Um grande ponto de reflexão deste curso é que todo processo de ensino dos fenômenos quânticos é realizado sem a utilização de

analogias clássicas ou de modelos semi-clássicos. O curso é todo estruturado sobre os princípios da mecânica ondulatória. De acordo com a avaliação dos pesquisadores, essa abordagem obteve êxito em ensinar corretamente as concepções quânticas para a maioria dos alunos, além de ter impedido a criação de concepções espontâneas muito comuns na maneira tradicional com que se é introduzido esses conhecimentos.

As inadequações com a realidade das escolas brasileiras começam a surgir quando da comparação com o tempo dedicado ao ensino de tópicos de FMC na Alemanha. No sistema alemão, têm-se turmas especialmente interessadas em Física (*Leistungskurse*), com 5 horas de aula semanais. Também existem turmas sem interesse específico (*Grundkurse*), que dispõe de 3 horas de aula por semana. Isso sem levar em conta as atividades preparadas para horas de estudo em casa para ambas as turmas.

É preciso destacar nesse momento um problema que enfrentamos e que certamente reflete a realidade de grande parte das escolas públicas do país. Dispúnhamos apenas de duas aulas de 50 minutos por semana. Como as aulas eram no mesmo dia, nosso problema se agravava ainda mais. Em um determinado período do ano letivo em que o curso foi implementado ficamos 5 semanas consecutivas sem aulas! As aulas aconteciam às segundas-feiras e, infelizmente, dois feriados consecutivos às terças-feiras levaram ao recesso escolar e, conseqüentemente, à não realização de 4 horas-aula. Nas três semanas que precediam aos feriados, houve reunião de pais, e dois conselhos de classe, encontros estes todos ocorridos em segundas-feiras.

Não raro, durante todo o ano, várias aulas cediam espaço para atividades culturais, como “A Semana da Higiene Bucal”, “Semana dos Esportes Radicais”, ou quando os alunos eram levados ao cinema. Desta forma, houve a perda de um número considerável de aulas.

Além de desorganizar qualquer planejamento educacional, cabe questionar se é possível que se efetue algum ensino de qualidade com tamanha restrição. É preciso refletir se um aluno consegue construir um conhecimento sólido, estabelecer relações coerentes dentro da estrutura em que ele se insere, se ao ser apresentado a um novo conceito físico, e somente após 5 semanas venha a se encontrar novamente com o professor.

Certamente essa prática, que dificulta demasiadamente a realização de qualquer processo efetivo de ensino-aprendizagem, não é freqüente nas escolas

européias ou americanas, influenciando sobremaneira na qualidade do ensino. Desta forma, acreditamos que qualquer proposta de curso forjada pelos pesquisadores destes países é alicerçada por um fator determinante: o tempo.

Outro destaque do trabalho de Müller e Wiesner é o uso de dois softwares exploratórios onde os alunos podem manipular um interferômetro de Mach-Zehnder e explorar o experimento da fenda dupla. Os excelentes softwares elaborados permitem, por exemplo, que através de filtros de polarização vertical e horizontal os alunos possam vir a perceber a natureza dual da luz. Colocando filtros ortogonais o padrão de interferência desaparece, sendo assim possível a detecção de fótons onde antes havia zonas de mínimo, revelando o caráter ora corpuscular, ora ondulatório dos objetos quânticos. Porém, para o manuseio efetivo desse software, os alunos devem estar formal e devidamente esclarecidos quanto à natureza eletromagnética da luz, bem como familiarizados com a polarização e outras características ondulatórias. Com toda essa bagagem conceitual não é preciso dispensar um grande número de aulas providenciando o suporte teórico necessário para que os alunos estabeleçam as relações imprescindíveis para que o software seja uma eficiente ferramenta pedagógica.

Jones (1991) utiliza como referência o Eletromagnetismo para ilustrar a relação que os alunos possuem com outros temas do conhecimento físico capazes de subsidiar explorações mais profundas de conceitos modernos. Ao fazer uma crítica da abordagem estritamente histórica da Física Moderna apresentada nos cursos secundários da Inglaterra (A – Level é um curso voltado para alunos entre 16 e 18 anos, semelhante a um curso pré-universitário), o pesquisador propõe uma abordagem que siga um percurso “lógico” até as formulações de Heisenberg e Schrödinger. Para reforçar essa proposta, ele afirma que no ensino do Eletromagnetismo não se faz essa opção historiográfica, e que através de um caminho lógico chega-se às equações de Maxwell²⁹. No Brasil, entretanto, este tópico do eletromagnetismo se encontra tão distante das salas de aula quanto à física quântica.

A maior discrepância entre o nosso Sistema de Ensino e o de países europeus e americanos é a relação de familiaridade dos alunos com o formalismo matemático. No citado curso criado por Müller e Wiesner (2002), a interpretação probabilística da Mecânica Quântica, comum aos dois tipos de turma (*Leistungskurse* e *Grundkurse*), parte da análise da função de onda ψ . Com isso, é necessária a

29 Ou seja, diferentemente do que ocorre no Brasil, no ensino de Eletricidade e Magnetismo, em um nível que se assemelha ao Ensino Médio brasileiro, é possível ir além da eletrostática!

compreensão de elementos de estatística, como o uso do desvio padrão para explicar o princípio da incerteza de Heisenberg.

Ao se considerar a *Leistungskurse*, o espaço que separa os alunos brasileiros dos alemães torna-se um abismo. A discussão matemática da função de onda é feita a partir da introdução do conceito de operador. Durante o curso aplicado pelos pesquisadores alemães, foi pedido aos estudantes que, por tentativa e erro, descobrissem qual operação matemática que fornece a energia cinética de elétrons

livres a partir de sua função de onda. Os alunos, então, chegam à $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2}$ que fornece o resultado desejado quando é aplicada à ψ . Da mesma forma, chega-se à equação de Schrödinger a partir do conceito de autovalores de uma equação. Os pesquisadores se referem a esta etapa do curso da seguinte maneira:

[...] nós demos uma introdução ao formalismo da mecânica quântica e suas aplicações em **um nível matemático bastante básico**. (MÜLLER e WIESNER, 2002, p. 205, grifo nosso).

Em outro artigo, Michelini *et alii* (2000) apresentam uma introdução à Mecânica Quântica a partir do formalismo de Dirac. Tal inserção é realizada ao se fazer um estudo da polarização linear de fótons interferindo com polaróides e cristais bi refringentes. Esta proposta foi experimentada nos quatro anos finais do equivalente ao nosso Ensino Médio na Itália. Um trecho do artigo é aqui destacado para que se possa refletir acerca de sua adequação à realidade nacional:

Nossa proposta é baseada na crença que as idéias básicas da MQ podem ser introduzidas sem a necessidade de um conhecimento matemático avançado. A fenomenologia relatada para a interação de fótons polarizados linearmente com cristais bi refringentes e polaróides **é tão simples que é quase trivial que um estado físico seja convenientemente representado por um vetor em um espaço abstrato**. Este background permite a introdução de algumas idéias [...], idéia de amplitude, significado geral de ortogonalidade entre estados físicos e a descrição física de processos de medida. Fazendo uso destes conceitos, **a transição do caso de fótons polarizados para um sistema físico qualquer é feita quase que naturalmente**. (MICHELINI *et alii*, 2000, p.406, grifos nossos)

A pertinência de se levantar estas questões em relação à matemática advém do fato de que talvez a maior dificuldade na criação de uma nova estrutura para os conceitos de FMC seja justamente a necessidade de contorná-la. É possível afirmar

que a matemática das escolas médias brasileiras está muito distante do que estes pesquisadores consideram como matemática básica. Sem dúvida, essa familiaridade com instrumentos conceituais serve para eles como guia para a criação de propostas que podem vir a se tornar, de fato, impossíveis de serem aqui implementadas.

Além disso, como os tópicos de FMC já estão devidamente incluídos no que pode se chamar de Ensino Médio americano e europeu, a discussão da comunidade de pesquisa em ensino nestes países é levada em outros termos. Enquanto aqui se discute como tornar efetiva esta inserção, estes países já possuem até uma “abordagem tradicional”, que então pode ser questionada pelos pesquisadores. Ou seja, enquanto eles já têm condições de refletir sobre a eficiência da forma com que esta parte da Física vem sendo ensinada, aqui as pesquisas encontram-se em uma etapa anterior, tentando realizar a árdua tarefa de levá-la para as salas de aula. A escassez nacional de propostas efetivamente testadas talvez *“demonstre uma necessidade de amadurecimento da linha de pesquisa FMC no ensino médio.”* (OSTERMANN e MOREIRA, 2002, p.25)

Para clarear ainda mais a diferença entre as realidades entre os países, trazemos uma constatação de Feynman acerca do ensino de Mecânica Quântica nas universidades americanas:

Há dois dias apenas, na nossa universidade, tivemos uma reunião na qual decidimos que já não é mais necessário ensinar uma disciplina de mecânica quântica elementar nos cursos de pós-graduação. Quando era aluno de mestrado, nem sequer havia na universidade uma disciplina de mecânica quântica; era considerada extremamente difícil. Tivemos uma quando comecei a ensinar pela primeira vez. Agora ensinamo-la aos universitários dos primeiros anos. Descobrimos, entretanto, que não temos que lecionar mecânica quântica elementar a licenciados de outras escolas. [...] porque, penso, conseguimos um melhor ensino na universidade e também porque os calouros estão mais bem preparados. (FEYNMAN *apud* SANTOS E AURETTA, 1991, p.16)

Outro sério agravante para a aplicação destes trabalhos de forma acrítica é que, em sua imensa maioria, não é possível determinar o referencial pedagógico utilizado para caracterizar o que os pesquisadores consideram como aprendizagem. Esta falta acaba por transformar boas propostas em grandes “caixas-pretas”, pois com a ausência de referenciais teóricos não se pode compreender claramente como se

deu, por exemplo, o processo de ensino-aprendizagem, causando dificuldades até em estabelecer vínculos entre as propostas e suas avaliações.

A quase totalidade dos trabalhos encontrados indica um grau de sucesso razoável. Porém, devido a esta carência de uma abordagem pedagógica é lícito questionar o que foi acatado como “aprendido”. Desta forma, as escolhas feitas pelos pesquisadores parecem mais estar de acordo com suas convicções pessoais do que com qualquer balizador educacional. A ausência de um referencial teórico impossibilita até, como veremos posteriormente, a escolha entre as diferentes correntes metodológicas.

Contudo, o que aqui foi considerado, de forma alguma, intenciona, ou mesmo insinua, dizer que os resultados destes trabalhos não são válidos para a comunidade brasileira de pesquisas em Ensino de Física. Porém, é necessário ressaltar que não há como fugir da triste condição em que se encontram as escolas e os alunos brasileiros. Acreditamos que, se tais particularidades do sistema educacional brasileiro não forem seriamente consideradas, será impossível que alguma pesquisa que vise à inserção de tópicos de FMC para o Ensino Médio seja, de fato, implementada com sucesso. Sem uma discussão profunda acerca da adequação das pesquisas de outros países à realidade do Brasil corre-se o risco de produzir trabalhos que não são possíveis de serem replicados, ficando assim restritos aos muros das Universidades, não estabelecendo a relação imprescindível entre a produção acadêmica e a Sociedade.

Encarar essa face distorcida da educação nacional pode fazer com que os problemas sejam tratados com equilíbrio, já que uma pequena dose de exagero é capaz de impedir a busca por soluções. Não se pode, por exemplo, fazer com que o problema da falta de domínio de um arcabouço matemático mínimo por parte dos alunos impossibilite a capacidade de oferecer alternativas. Tampouco, pode-se transferir a responsabilidade de superação dessa defasagem conceitual aos professores e pesquisadores em Ensino de Matemática.

Assim, para que de fato se realize a tão desejada inserção destes temas nas escolas, acreditamos ser preciso que a comunidade de pesquisa em Ensino disponibilize mais esforços para realizar estudos de como fazer para que estes conteúdos sejam introduzidos nas salas de aula, alijado de seu ferramental matemático inadequado à realidade dos alunos brasileiros. Ao mesmo tempo, é preciso gerar soluções que não caiam em meras simplificações ou que induza a erros

ou visões distorcidas sobre as ciências. É imprescindível que tais soluções sejam de fato implementadas em salas de aula reais, com todas as peculiaridades que tornam único o nosso Sistema de Ensino. Com os resultados obtidos em pesquisas talvez seja possível a criação e indicação de caminhos mais concretos de serem percorridos.

5.4 – Os conteúdos de FMC presentes nos livros didáticos

Os livros didáticos desempenham um papel fundamental na consolidação da transposição didática, visto que, na maioria das vezes, servem de referência básica do Saber a Ensinar e de apoio para a confecção do Saber Ensinado. Sendo assim, com o intuito de nos inteirarmos sobre o que é considerado “Saber a Ensinar” relativo à FMC, fizemos um pequeno levantamento dos conteúdos presentes em alguns livros didáticos disponíveis no mercado.

Um levantamento semelhante aparece em Ostermann e Moreira (2002), restrito a três livros em português, onde o conteúdo abordado é relacionado. Para nós, além disso, é interessante olhar a forma como os temas modernos estão plasmados nos livros, visto que nosso objetivo principal neste levantamento é buscar entender como a Transposição Didática destes temas tem sido feita. Cientes da existência de uma estrutura de transposição didática consolidada para os tópicos da Física Clássica, procuramos averiguar o quanto o caminho utilizado pelos autores para transpor os temas de Física Moderna se assemelha à forma de transposição tradicional.

O resultado desta análise permite, por um lado, depreender quais conteúdos devem estar presentes na sala de aula, segundo a perspectiva dos integrantes mais tradicionais da Noosfera. Por outro lado, revela tendências de como essa parte da Física tem sido tratada pelos autores deste segmento. Inicialmente, cogitamos a possibilidade de utilizá-los como guias para a confecção do curso, percebendo nesta etapa os problemas que podem surgir ao se utilizar estes livros.

Fizemos o levantamento dos tópicos relacionados à Física Moderna presentes nos seguintes livros: *Física: História & Cotidiano* - Bonjorno e Clinton, volume 3, São Paulo, editora FTD, 2003; *As Faces da Física* - Carron, W. Guimarães, O., volume único, São Paulo, Moderna, 1997; *Física para o Ensino Médio* - Gonçalves Filho, A. Toscano, C., volume único (Série Parâmetros), São Paulo, Scipione, 2002; *Física* - Sampaio & Calçada, volume único (Coleção Ensino Médio), São Paulo, Atual, 2003; *Física: Eletromagnetismo e Física Moderna* – Gaspar, A., São Paulo, Editora Ática, 2003.

5.4.1 – O levantamento dos temas

Livro	Capítulos	Sub-Capítulos
<i>Física: História & Cotidiano</i> Bonjorno e Clinton FÍSICA MODERNA UNIDADE 4 Livro com 455 páginas. Apenas 34 de FMC	Teoria da relatividade	Teoria da relatividade especial
		Dilatação do tempo
		Contração do comprimento
		Massa relativística
		Equivalência entre massa e energia
	As idéias da Física Quântica	Radiação do corpo negro
		A constante de Planck
		Radiação térmica e a cor dos metais aquecidos
		Efeito fotoelétrico
		O efeito Compton
		Dualidade onda-partícula
		Modelo atômico de Bohr
		Modelo atômico atual
		Princípio da incerteza
		Mecânica quântica
	Radioatividade	Radioatividade natural
		Tipos de emissão
		A fusão nuclear
		A fissão nuclear
		Seção Física e cotidiano: Células fotoelétricas e Big bang
		Seção a história conta: A missão científica de Sobral

Livro	Capítulos	Sub-Capítulos
<i>As Faces da Física</i> Carron, W. Guimarães, O. PARTE IV: FÍSICA MODERNA Livro com 672 páginas. Apenas 10 de FMC	Física atômica e relatividade	A radiação do corpo negro
		O efeito fotoelétrico
		A estrutura do átomo
		A teoria da relatividade
	Radioatividade e Física nuclear	Radioatividade
		Física nuclear

Livro	Capítulos	Sub-Capítulos
<i>Física para o Ensino Médio</i> Gonçalves Filho, A. Toscano, C. Livro com 480 páginas. Apenas 08 de FMC	Física Térmica e Óptica	Luz: partícula ou onda?
		Como a matéria é vista por dentro?

Livro	Capítulos	Sub-Capítulos
<i>Física</i> Sampaio & Calçada UNIDADE 6 - FÍSICA MODERNA Livro com 472 páginas. Apenas 31 de FMC	A Teoria da Relatividade	
	Mecânica Quântica	
	Partículas elementares	

Livro	Capítulos	Sub-Capítulos
Física : Eletromagnetismo e Física Moderna Gaspar, A Livro com 448 páginas, com 100 de FMC I	Das ondas Eletromagnéticas aos Fótons	A natureza corpuscular das ondas eletromagnéticas
		A dualidade onda-partícula
		O eletromagnetismo, a óptica e os fótons
	Relatividade	As coordenadas do espaço-tempo
		A relatividade galileana
		A relatividade e o movimento ondulatório
		O enigma do éter
		Os postulados da Teoria da Relatividade Restrita
		A impossibilidade da simultaneidade
		A dilatação do tempo
		A relatividade das velocidades
		Quantidade de movimento e a massa relativística
		Energia relativística
		Energia e quantidade de movimento relativística
	Dos Raios X aos Quarks – I	Os raios x e a radioatividade
		Raios catódicos, raios beta, elétron
		Radiação térmica
		O enigma do espectro da radiação térmica
		O quantum de ação
		O átomo de Rutherford
		O espectro do átomo de hidrogênio
		O átomo de Bohr
		A experiência de Frank-Hertz
		A difração dos raios x
	Dos Raios X aos Quarks – II	O spin do elétron
		Pauli e o princípio da exclusão
		As ondas de matéria
		A mecânica ondulatória
		O princípio da incerteza

		O nêutron e o pósitron
		O neutrino e a conservação de energia
		O novo modelo atômico e o núcleo
		Energia nuclear
		Um novo tipo de partícula
		A física de partículas

5.4.2 – Um olhar sobre os livros didáticos

De modo geral, os livros didáticos têm uma abordagem superficial, o que limita a tentativa de entender de qual maneira esses temas foram transpostos, evidenciando uma mera apresentação episódica e simplificada de parte de alguns conteúdos de FMC. Os tópicos abordados demasiadamente curtos, com um tratamento conceitual raso, tornando difícil entender os objetivos de ensino pretendidos. A quantidade de páginas dispensadas a esses temas indica a importância atribuída a eles por estes autores. Estamos convencidos de que a inserção da FMC nestes livros é fruto apenas de uma imposição editorial, talvez um reflexo das prescrições contidas nos PCNs.

O livro *Física: Eletromagnetismo e Física Moderna*, de Alberto Gaspar, é o único que foge a essa estrutura simplória. O autor dedica uma boa parte de um dos volumes de sua obra (composta por três livros) à apresentação de temas de Física Moderna, e pode-se perceber que há uma proposta de ensino a ela vinculada. Além disso, por tratar-se de um livro de boa aceitação pelos professores, optamos por analisá-lo mais detalhadamente.

É preciso exaltar a iniciativa deste autor em transpor os tópicos de FMC para o Saber a Ensinar, ainda que tenhamos críticas à forma por ele adotada. As obras dos outros autores que encontramos são muito difíceis de serem analisados, pois simplesmente optaram por acrescentar, em poucas páginas, uma listagem de conteúdos modernos, sem qualquer comprometimento didático ou pedagógico. Gaspar, ao contrário destes, encara o desafio de fazer esta transposição, e com isso, inevitavelmente, se expõe às críticas.

Os problemas que encontramos neste livro exemplificam a complexidade da transposição destes temas para o Ensino Médio. Por meio deles pode-se perceber como é errôneo considerar o processo de transposição didática como uma mera simplificação conceitual. Neste caso específico, a tentativa de escapar da complexidade do formalismo matemático pode conduzir a erros, conceituais ou epistemológicos, revelando a difícil tarefa de levar a FMC para as salas de aula. Sendo assim, ainda que com ressalvas, a tentativa de Alberto Gaspar deve ser admirada.

Certamente, trata-se do autor brasileiro que mais se preocupou com a inserção dos temas de FMC no Ensino Médio. No último volume, de uma coleção com

três livros, 100 das 448 páginas são destinadas aos temas de FMC. É interessante notar sua preocupação em deixar clara a diferença de significados de palavras idênticas que são utilizadas tanto no dia-a-dia quanto no contexto científico. Para isso, o autor se utiliza de pequenos boxes intitulados: “Gramática da Física”. Estes boxes não são restritos aos temas de Física Moderna, mas presentes em todos os três volumes. A estratégia do uso dos boxes também é utilizada para “salpicar”, no texto principal, pequenos relatos históricos, aplicações no cotidiano, deduções matemáticas, questões para aprofundamento e discussões. Desde o início deste volume, temas de FMC aparecem, de forma sumária, nestes boxes³⁰.

No capítulo 11(*Das ondas eletromagnéticas aos fótons*), Gaspar inicia sistematicamente a introdução dos temas modernos ao discutir a natureza da luz, apresentando a dualidade onda-partícula. O capítulo 12 é dedicado ao estudo da relatividade, seguindo o mesmo padrão dos capítulos anteriores. Contudo, nos dois últimos capítulos (*Dos raios X aos quarks – I e Dos raios X aos quarks – II*) o autor utiliza outra abordagem, priorizando a “*história das idéias e descobertas que revolucionaram a física do final do século XIX às primeiras décadas do século XX*”. (GASPAR, 2003, p. 327).

Gaspar confere um tratamento abrangente aos temas, porém seguindo o caminho trilhado pela Transposição Didática dos temas da Física Clássica, este livro tende a enfatizar a dimensão empírica da ciência. É bastante comum que a inserção e discussão dos conceitos se iniciem por meio de experimentos.

Após analisarmos todos os exercícios encontrados nos capítulos destinados aos conceitos de FMC percebemos que o autor se utilizou apenas do tipo de operacionalidade tradicional no ensino de Física, já que a quase totalidade dos exercícios consiste simplesmente na aplicação de fórmulas, como pode ser visto nos exemplos abaixo:

5. A superfície de um coletor de alumínio polido é atingida por uma radiação ultravioleta de frequência $1,2 \cdot 10^{15}$ Hz. Sabendo que a função trabalho do alumínio é 4,1 eV, determine:
- a) a energia dos fótons dessa radiação em elétrons-volt;
 - b) a energia cinética máxima dos elétrons emitidos por essa radiação;
 - c) a frequência de corte, menor frequência capaz de provocar a emissão de elétrons do alumínio. (GASPAR, 2003, p. 287)

30 Os boxes sobre FMC podem ser encontrados nas páginas: 9, 112, 139, 192, 193.

4. Determine a contração percentual de comprimento, em relação ao comprimento em repouso, sofrida por:

- a) um avião supersônico, com velocidade de 600 m/s, em relação à Terra;
- b) uma nave alienígena, com velocidade igual a $0,40c$, em relação à Terra. (GASPAR, 2003, p. 311)

1. Determine o comprimento de onda de:

- a) um elétron de massa $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg com velocidade $v_e = 6,0 \cdot 10^6$ m/s
- b) uma bola de futebol de massa $m_b = 0,4$ kg com velocidade $v_b = 20$ m/s. (GASPAR, 2003, p. 359)

3. Um elétron move-se na direção do eixo x com velocidade de $3,0 \cdot 10^6$ m/s. Supondo que se possa medir essa velocidade com uma incerteza de 2,0%, qual é a incerteza na medida da posição desse elétron? (GASPAR, 2003, p. 365).

Curiosamente, no manual do professor, que acompanha a coleção dos livros, Gaspar faz a seguinte afirmação quando se refere aos capítulos de FMC:

Infelizmente, o professor de física está muito pouco habituado a essa forma de apresentar a física. Ele reclama da matemática, mas não sabe viver sem ela. Para ele, ensinar física sem resolver problemas e aplicar formulinhas parece impossível, parece aula de história ou geografia, não de física. (GASPAR, 2003, p.131)

Ainda assim, mesmo com essa crítica aos professores, o autor, não realiza algo diferente. A grande maioria dos exercícios relativos à FMC presentes em sua obra não foge às características por ele criticadas.

Algo que também chamou-nos a atenção foi a postura epistemológica do autor ao tratar um aspecto da interpretação quântica. Em um dado momento, tratando da mecânica ondulatória como a mais conhecida formulação da mecânica quântica, lê-se:

Mas, como costuma acontecer nas novas formulações teóricas da física, a matemática utilizada leva ao aparecimento de novos termos, constantes ou funções que precisam ser interpretadas pela física. Se a teoria estiver correta, se ela explicar adequadamente o comportamento da natureza, **todos os seus termos devem ter algum significado físico, devem expressar alguma característica da natureza**, o que nem sempre é fácil de perceber. (GASPAR, 2003, p.361, grifo nosso)

Porém, logo na página seguinte, o autor se contradiz. Ele apresenta a interpretação dada por Max Born para o módulo quadrado da função de onda como uma densidade de probabilidade, ou seja, uma grandeza estatística. Gaspar comenta que mesmo com o grande choque que gerou nos físicos (nem mesmo de Broglie e Schrödinger, que formularam matematicamente a função de onda, a aceitaram), tal interpretação acabou prevalecendo. Com isso ele encerra o assunto desta forma:

Embora gere profundas implicações filosóficas, estas não são objeto de estudo da física. **Ela apenas descreve matematicamente o comportamento que detecta na natureza** e, feliz ou infelizmente, as novas descobertas continuam a confirmar o seu caráter estatístico. (GASPAR, 2003, p.362, grifo nosso)

Ou seja, o autor define de forma epistemologicamente diferente o papel da Física na construção do conhecimento. De modo surpreendente, neste mesmo trecho, a afirmação de que *“profundas implicações filosóficas, estas não são objeto de estudo da física”* se choca frontalmente com um texto presente no manual do professor:

É preciso que o professor de física se convença de que a física é uma ciência de reflexão, uma *filosofia da natureza*, como era chamada antigamente com muita propriedade. As fórmulas ou expressões matemáticas apenas coroam essas reflexões e possibilitam critérios para verificar sua validade. [...] *Um bom físico não é apenas um bom matemático; é antes de tudo um bom filósofo.* (GASPAR, 2003, p.131, destaque do autor)

Assim, parece haver um desacordo entre o discurso elaborado para os professores e o discurso presente no corpo do livro texto, de forma que não foi possível compreendermos qual foi a intenção do autor ao se dirigir aos professores de uma forma e aos alunos de outra.

Outro ponto que nos pareceu inadequado foi o tratamento dado pelo autor aos campos na Física, em especial o campo eletromagnético. Após trabalhar a idéia clássica de campo durante três capítulos, para defender a sua convicção da natureza corpuscular da luz (lê-se em um trecho: *“para a física atual, não há dúvida que um feixe de luz é um feixe de partículas”*, p.291, grifo nosso) o autor afirma o seguinte:

Grandezas físicas como campos eletromagnéticos que se propagam no espaço completamente vazio, sem suporte algum, descritas por linhas de força ou de campo, **entes puramente matemáticos**, nunca foram facilmente compreensíveis. [...] É certamente mais fácil aceitar que existam partículas portadoras, **como os fótons, de existência materialmente comprovada**, que

se propagam pelo espaço transportando energia e viabilizando interações do que acreditar que elas se efetivem por ação de entes matemáticos abstratos. (GASPAR, 2003, p.296, grifo nosso)

Além de enfatizar a visão empiricista e positivista, o autor gera um problema epistemológico ao afirmar que o fóton tem existência material comprovada. Qual seria esta comprovação material? E dentro deste contexto, por exemplo, a transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas não seriam também uma comprovação material dos campos, considerados por ele apenas como entes matemáticos abstratos? O fóton não se encaixa como um ente matemático abstrato? Ou seja, há uma reificação do fóton, agora transformado em “coisa”, e uma degradação do conceito de campo, largamente utilizado pelo autor neste livro, tanto no eletromagnetismo quanto na apresentação do campo gravitacional.

Esta atitude também se contrapõe com a relevância de práticas experimentais tradicionais de eletromagnetismos enfatizadas pelo autor no manual do professor. Uma delas, que permite a formação de linhas de campo com o uso de ímãs e limalha de ferro é considerada fundamental, pois sua *“importância está na visualização da tridimensionalidade do campo magnético – que vale para qualquer campo, aliás.”* (GASPAR, 2003, p. 109). Ou seja, o autor propõe a façanha de se construir uma experiência que permite a visualização de entes que não existem, já que são considerados por ele apenas abstrações, entes puramente matemáticos! Com isso, não é possível saber qual visão de ciência intencionou-se transmitir aos alunos: uma visão próxima a um realismo ingênuo, ou uma visão totalmente instrumentalista.

Cabe ainda levantar uma discussão particular sobre a maneira como o problema da representação do mundo microscópico, materializado na dualidade onda partícula, é tratado pelo autor. Consideramos a existência de um equívoco na forma de representação que Gaspar utiliza, já que faz uso da interpretação corpuscular – que por si só apresenta diversos problemas (PESSOA JR, 2003), de maneira errônea, bem como na forma de apresentar aos alunos o problema da dualidade, já que o faz como se essa interpretação fosse a única, totalmente correta e definitiva.

Certamente, um dos maiores problemas encontrado no Saber a Ensinar contido nos livros didáticos é a apresentação do conhecimento Físico de forma dogmática. Prática muito comum na apresentação dos saberes religiosos, onde não há espaço para discussão nem questionamentos aparece invariavelmente nos livros de ciência (KUHN, 1987). Este dogmatismo pode ser encontrado na forma utilizada pelo

autor para lidar com a complexidade conceitual e, principalmente, filosófica de alguns assuntos.

Com relação aos capítulos destinados à FMC, em vários momentos, o autor recorre à autoridade da dimensão empírica para não avançar em uma discussão epistemológica mais complexa que surge com a estranheza e o inusitado destes conceitos. Por exemplo, ao discutir a natureza corpuscular das ondas eletromagnéticas, apresenta a experiência de Mayer e Gerlach e finaliza a discussão da seguinte forma:

Essa experiência **demonstra, portanto, de forma inequívoca**, o caráter corpuscular da luz. Para reforçar essa idéia, vamos mostrar como os fótons podem ser tratados numericamente, como partículas, nos exercícios resolvidos a seguir. (GASPAR, 2003, p.290, grifo nosso).

A mesma atitude pode também ser encontrada quando o autor apresenta dualidade onda-partícula. Ele assim se refere:

[...] **as experiências descritas demonstram claramente** que a luz é constituída por partículas perfeitamente identificadas – os fótons. No decorrer do longo e histórico debate entre o modelo corpuscular e ondulatório da luz [...] atualmente seria, de novo, a vez de admitir o modelo corpuscular. Mas não é bem assim. Embora haja evidências incontestáveis da natureza corpuscular da luz, há também fenômenos luminosos que só se explicam adequadamente com a teoria ondulatória. Por isso, há quem diga ainda hoje que a luz tem um caráter dualístico [...] **Na verdade, essa afirmação não é correta, essa dualidade alternativa, uma coisa ou outra, não existe.** (GASPAR, 2003, p.291, grifo nosso)

Além de dogmática, tal atitude revela uma visão empiricista e positivista da ciência, pois mostra que a base do conhecimento está na experiência, e essa é a dimensão que no fundo atesta o fenômeno. Por exemplo, ainda na seção que trata da dualidade onda-partícula, o autor utiliza-se dos resultados de experiências para afirmar a inexistência do caráter dual da luz:

Elas **[as experiências] mostram que essa disparidade, na realidade, não existe**, pois fótons não são projéteis, como chumbinhos de caça; fótons são fótons. (GASPAR, 2003, p.293, grifo nosso)

A insistência do autor em caracterizar, de forma dogmática, a luz como partícula acaba, em nossa opinião, comprometendo todo seu esforço em introduzir os

temas modernos no Ensino Médio. Além de fazer afirmações pouco esclarecedoras para os alunos como “*fótons são fótons*”, Gaspar torna seu texto obscuro ao por fim à dualidade onda-partícula. A imposição do comportamento corpuscular conduz, por exemplo, a um problema que encontramos na apresentação do tema. Ao tratar das figuras de interferência que surge no experimento da dupla fenda para fótons individuais ele faz a seguinte afirmação :

Essas regiões são determinadas pelos diferentes fatores que intervêm na experiência, como a frequência do fóton, a largura das fendas, a distância entre elas e a distância das fendas ao anteparo. A determinação dessas regiões nada tem que ver com a descrição ondulatória, que explica a existência dessas regiões pela superposição de ondas que atingem o anteparo na mesma fase ou em fases opostas. **Em outras palavras, não se trata de interferência**, mas de uma configuração estatística mais provável, bem determinada matematicamente. (GASPAR, 2003, p.294, grifo nosso).

Contudo, ele se contradiz logo em seguida, após utilizar uma analogia com o registro das posições de bolas de que atravessam o gol durante todas as partidas de futebol realizadas no Brasil durante um ano para explicar as figuras de interferência. O autor cita que as regras do futebol determinariam as regiões de maior concentração de áreas do gol atingidas pela bola. Assim, a região central, por causa do goleiro, seria menos atingida, deixando as regiões próximas às traves com uma maior concentração de bolas. O autor diz que se pudéssemos acompanhar os registros dessas boladas durante todo o ano veríamos aos poucos a formação de uma configuração

[...] exatamente como a **figura de interferência dos fótons individuais** que atravessam as fendas duplas. (GASPAR, 2003, p.295, grifo nosso)

Isto é, inicialmente Gaspar afirma que não há interferência, mas, logo depois, fala da figura de interferência dos fótons individuais. Na tentativa de manter sua visão corpuscular da luz o autor acaba se fazendo, no mínimo, confuso.

Gaspar ainda justifica a inexistência da dualidade onda-partícula utilizando uma interpretação, no mínimo, estranha. Parece ser um híbrido de uma interpretação corpuscular com a interpretação dos coletivos estatísticos, pois assim ele define a luz:

para a física atual, não há dúvida que um feixe de luz é um feixe de partículas, isto é, um feixe de fótons. A dualidade surge em relação ao comportamento coletivo desse feixe, que é ondulatório. (GASPAR, 2003, p.291)

Ao dizer que para a Física atual não há dúvidas quanto à natureza da luz, pode-se perceber que o autor opta por fugir ao enfrentamento dos problemas filosóficos advindos das possíveis interpretações da dualidade onda-partícula. Ele prefere, de maneira taxativa, dizer que tal dualidade não existe, colocando fim em uma discussão inacabada, tanto para cientistas como para filósofos (discussão que consideramos de grande valor pedagógico). cremos que com essa escolha o autor talvez tenha perdido uma excelente oportunidade para despertar nos leitores a curiosidade para o estranho comportamento dos objetos quânticos. Desta forma Gaspar deixa de convidar seus alunos a fazer uma nova leitura da Física e da Ciência, preferindo apresentá-la de forma extremamente dogmática.

Encontramos no manual do professor, na apresentação do capítulo que inicia a apresentação dos temas de FMC, indícios de que o autor desconhece o processo de Transposição Didática, bem como subestima os problemas conceituais envolvidos na Mecânica Quântica e, principalmente, no ensino desses conceitos:

A idéia é de fato fascinante, **mas também simples e acessível**, não só ao nosso aluno do ensino médio como a qualquer pessoa que tenha alguma formação em ciência. [...] É importante que o professor a estude sem preconceitos, sem pensar que vai entrar num mundo enigmático de idéias incompreensíveis. **Temos certeza de que ele vai se surpreender com a simplicidade desse conceito.** Pode ser que ele resista a aceitá-lo, que duvide de que a natureza seja de fato como os físicos atuais a descrevem, o que é compreensível – mas dificilmente ele vai deixar de entender o significado da dualidade onda-partícula. (GASPAR, 2003, p.132, grifos nossos)

Com tais afirmações, passa-se a impressão que basta ser menos resistente, menos preconceituoso, para se compreender o problema central da Teoria Quântica. Certamente é, no mínimo, ingenuidade considerar que os conceitos envolvidos na compreensão da dualidade onda-partícula sejam simples. Contudo, estas afirmações acabam por justificar a opção do autor em abordar o tema de forma tão dogmática. Ele, então, opta em terminar com o problema da natureza dual da luz, impondo a visão corpuscular, fazendo um apelo à autoridade experimental (*as experiências demonstram, de forma inequívoca*) e à autoridade dos cientistas (*para a física atual, não há dúvida que um feixe de luz é um feixe de partículas*). Somente assim, de modo equivocado e distorcido, é possível revelar a “*simplicidade dos conceitos*” da FMC.

O que fica claro na análise acima é que não há como apresentar o conhecimento físico desvinculado de uma concepção epistemológica. No caso aqui

analisado, por se tratar da apresentação de um tema não tradicional no Ensino Médio, as lacunas, imprecisões e parcialidades na forma de conceber o papel, o alcance, a sustentação e o significado intrínseco dos conceitos de Física Moderna comprometem a apresentação do conteúdo. Como será o Saber Ensinado produzido a partir disso? Qual a concepção de conhecimento físico será construída pelo aluno como resultado de sua interação com essa obra?

Com isso, achamos necessário que tal obra seja tratada com cuidado, buscando esclarecer qual visão de ciência se deseja transmitir aos alunos.

Os livros didáticos tradicionais apresentam um rol de Saberes a Ensinar relativos à FMC. Aparentemente, tais temas parecem, então, terem sido contemplados. No entanto, uma análise um pouco mais profunda permite questionar a forma com que esta inserção foi realizada.

As críticas feitas por Merzbacher (1990), de que os temas relacionados à FMC só aparecerem ao final das obras, nos últimos capítulos, podem ser estendidas a todos os livros que constam neste trabalho. Cabe discutir o porquê desta ordenação. Levantamos duas hipóteses: estes autores consideram que somente é possível aprender conceitos de Física Moderna após o domínio dos conceitos de Física Clássica ou há uma ordem implícita para tratá-los somente no final dos programas curriculares, caso algum tempo tenha sobrado.

O fato interessante é que ao compará-los com o conteúdo de coleções extensamente utilizadas em cursos básicos de graduação, pode-se encontrar uma sequência quase idêntica (HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. 1996; TIPLER, P. A. 1995). Fato esse já antecipado pela Teoria da Transposição Didática. Para ALVES-FILHO:

Enquanto o livro ou manual didático universitário é resultado de uma transposição didática de fato, o livro didático destinado ao Ensino Médio é o espelho de um processo de simplificação que busca adequar linguagem e recursos matemáticos mínimos para manter o corpo estrutural do saber a ensinar. (ALVES-FILHO, p.230)

Constatamos que ao utilizá-los de maneira passiva, corre-se o risco da Física Quântica ser, por exemplo, introduzida no Ensino Médio apenas como um passeio pelo seu desenvolvimento histórico, com uma série de informações relativas a datas e

cientistas conhecidos, como Planck, Einstein e Bohr. Também é possível perceber que a grande maioria dos livros traz a caracterização e desenvolvimento dos saberes a partir de uma visão empírica e com ênfase no mito dos “experimentos cruciais”.

Vemos, por exemplo, que quase todos os livros iniciam o estudo da Quântica apresentando a radiação do corpo negro, usada como referência para a definição e justificativa do conteúdo conceitual que será posteriormente apresentado. Tal postura pode levar os alunos a acreditar que todo o processo de construção teórica do conhecimento começa a partir dos dados empíricos. Assim, ao se elaborar um texto didático desta forma, fazendo uso dos experimentos, pode se conduzir à idéia de que todo o saber científico construído é extraído diretamente da própria natureza. A construção do conhecimento parece começar somente a partir da observação direta e da análise neutra dos dados obtidos através dos experimentos. Esta forma de apresentação, contida na grande maioria dos livros, acaba por disseminar uma concepção empirista da ciência (CHALMERS, 2001).

Contudo, como foi exposto inicialmente, a necessidade da construção de uma nova estrutura para os conceitos científicos, quando trazidos de seu ambiente original pra a sala de aula, obriga que estes livros didáticos tragam seus conteúdos conectados, ligados por uma seqüência coerente e formal. Dentro desta perspectiva, é inevitável que ocorra, durante essa reestruturação, algum tipo de “deformação” dos fatos e processos de construção do conhecimento. A Teoria da Transposição Didática indica a inevitabilidade desses desvios, mas alerta que isto deve ser fruto de um compromisso pedagógico e não como mera simplificação.

Ao traçar uma estratégia para lidar com a relação ensino-aprendizagem um professor necessita, implícita ou explicitamente, fazer um conjunto de escolhas sobre quais teorias trabalhar e, principalmente, como este ensino se processará. Contudo, ele necessita considerar que a teoria escolhida é embasada em uma série de pressupostos que, de forma indireta, alicerçam sua visão de ciências e, conseqüentemente, influenciam sua forma de ensinar. O mesmo ocorre com os autores de livros didáticos, sendo assim imprescindível a análise crítica dos professores ao fazerem uso destes materiais para implementação do Saber Ensinado.

A Transposição Didática mostra que é inevitável a existência de uma “distorção” dos fatos em nome da criação de uma nova estrutura que pode vir a ser apreendida pelos alunos. Porém, cabe aos professores, durante o Saber Ensinado,

analisar de maneira crítica quais são as bases epistemológicas e filosóficas que guiam suas escolhas. Neste momento a Transposição Didática torna-se

[...]uma ferramenta que permite recapacitar, tomar distância, interrogar as evidências, pôr em questão as idéias simples, desprender-se da familiaridade enganosa de seu objeto de estudo. Em uma palavra, é o que lhe permite exercer sua vigilância epistemológica. (CHEVALLARD, 1991, p.16)

Cada conceito traz embutido em si posições epistemológicas e posicionamentos filosóficos que, normalmente, não são explicitados pelos autores dos livros. Por exemplo, a idéia dos “experimentos cruciais”, embora seja uma maneira didaticamente cômoda de apresentar conteúdos científicos, não se sustenta filosoficamente (ver a discussão filosófica acerca da subdeterminação das teorias pelos dados empíricos em CHIBENI, 1997) Assim, o Saber a Ensinar contido nos livros didáticos reproduz, de forma hegemônica, uma visão positivista da Ciência. Cabe ao professor tomar consciência deste fato e decidir se esta visão se coaduna com seus objetivos e, principalmente, se é a visão de ciência que deseja transmitir aos alunos.

Sendo assim, em vista do acima exposto, optamos em abandonar a seqüência e a forma com que os tópicos de FMC vêm sendo expostos nos livros didáticos. Nossa escolha foi a de não distorcemos os fatos que pudessem findar uma discussão importante na história e filosofia da ciência, ainda que isso facilitasse demasiadamente nosso trabalho. Inicialmente, pensamos em mostrar apenas uma das interpretações possíveis para a natureza da luz, inserindo a dualidade e mostrando as incertezas do processo de criação científica. Porém, como desejávamos tratar este tema de maneira não dogmática, impondo uma única explicação para a natureza da luz, decidimos apresentar as quatro interpretações. Com o intuito de discutir e trabalhar a parte antiintuitiva da Física Quântica, encontramos em Pessoa Jr um balizador para a decisão que tomamos, visto que ele afirma que

Podemos concluir que a MQ fornece uma explicação cujas premissas vão contra a intuição ligada ao senso comum. Para “compreender” a MQ, portanto, é necessário mergulhar em seus princípios e conceitos fundamentais, e trabalhá-los de maneira que se tornem mais intuitivos, que fiquemos mais familiarizados com eles. O fato de existirem diferentes interpretações talvez facilite este processo, permitindo que o aluno escolha aqueles princípios interpretativos que mais se aproximem de suas concepções espontâneas. (PESSOA JR., 2003, p.153)

Acreditamos que tal escolha é imprescindível quando se deseja ir além de simplesmente transmitir informações. Assim, optamos por apresentar a possibilidade de diferentes interpretações, sempre reforçando a idéia de que a luz tem seu referente na realidade, mas o problema surge quando se tenta traduzi-la em termos de algo de nosso cotidiano.

Para não incorrer nos mesmos erros que encontramos ao analisarmos os livros, optamos por um tratamento epistemológico no qual todas as quatro interpretações da Mecânica Quântica foram privilegiadas, determinando uma característica particular do curso que elaboramos. Certamente que esta escolha gera fragilidades, como, por exemplo, o fato de não explorarmos o formalismo matemático mais profundamente, de modo que a parte matemática do curso foi prejudicada. Entretanto, por considerarmos fundamental revelar aos alunos que os entes no mundo quântico não têm a determinação indubitável dos entes no mundo clássico, a indeterminação *a priori* dos objetos quânticos foi preservada.

Acreditamos que todo e qualquer ato educacional reflete um posicionamento epistêmico. Portanto, é de suma importância que educadores busquem, cada vez mais, uma tomada de consciência acerca da maneira como encaram a origem do conhecimento científico, seus processos de validação e transmissão, bem como as relações existentes entre a sua disciplina e as outras áreas do conhecimento. Somente desta forma, um professor atuante pode perceber que concepções filosóficas têm sérias conseqüências em sua prática pedagógica. Assim, ao levar isso em conta durante o processo de construção do Saber Ensinado será possível que reflexões epistemológicas encontrem espaço nas discussões em sala de aula.

É preciso explicitar que as estratégias traçadas durante a elaboração de nosso curso se apoiaram em escolhas feitas *a priori* e *a posteriori*. Elas resultaram de um misto das propostas teóricas geradas e discutidas entre os pesquisadores e professores do Ensino Médio participantes do grupo de pesquisa (muito particularmente da professora que aplicou o curso) bem como a partir da análise crítica dos trabalhos desenvolvidos na área. Contudo, é necessário ressaltar que algumas escolhas foram guiadas pela intuição refinada pela prática da professora ao lidar com os alunos do Ensino Médio. Tais escolhas foram imprescindíveis para a implementação do curso. Além disso, a realização do curso foi redefinindo a seqüência inicialmente pensada, de forma a se adequar aos resultados obtidos.

Dessa forma, é importante apresentar brevemente o histórico de produção e aplicação do curso. Em 2003, foi desenvolvido e aplicado um curso piloto, que serviu de ponto de partida para as reflexões mais analíticas do grupo (dita Terapêutica nos termos da Transposição Didática). Esta terapêutica é recente, mas de certa forma serviu-nos de guia. Talvez seja extremamente precoce chamar tal processo de Terapêutica, no sentido dado pela Transposição Didática, pois não se pode afirmar que os mesmos fracassos e sucessos apresentados pelos materiais e atividades aplicados seriam reproduzidos por outros professores se não a que os aplicou. Ainda assim, os resultados deste piloto nos serviram como orientação para a reelaboração do curso analisado no presente trabalho, bem com os textos e atividades que dele fazem parte.

5.5 – O curso: desafios iniciais

Decididos a abandonar a sequência tradicionalmente encontrada nos livros didáticos, começamos a busca pelo tema introdutório, a “porta de entrada”, para os fenômenos quânticos em sala de aula. Guiados pela Transposição Didática, que nos orientou quanto à produção dos saberes escolares, procuramos apoio nos trabalhos clássicos de Piaget e Bachelard, extensamente utilizados nas pesquisas da área, para nos sustentar quanto ao ensino destes saberes. Optamos, assim, por começar a introdução dos conceitos quânticos a partir de algo mais próximo dos alunos pois,

[...] toda aprendizagem vem interferir com um “já existente” conceitual que, ainda que falso num plano científico, serve de sistema de explicação eficaz e funcional para o docente. (ASTOLFI e DEVELAY, 1995, p.35)

Este foi um momento crucial do processo de confecção do curso. A dúvida pairava sobre qual o melhor caminho a ser seguido: esgotar os modelos clássicos ou não fazer referências a eles, salientando desde o início as características quânticas?

Como exposto anteriormente, além da carência em pesquisas acerca de metodologias testadas em salas de aula sobre o ensino de FMC, da inadequação dos trabalhos estrangeiros à realidade brasileira e da falta de referenciais pedagógicos que os orientam, há uma total discordância em relação às estratégias a serem utilizadas na introdução do tema. Não há um consenso acerca da adequação (ou não) de se ancorar características quânticas às clássicas.

Fischler e Lichtfeldt (1991 e 1992) talvez sejam os grandes opositores do uso de modelos e analogias clássicas, seguidos por Rüdinger, 1976; Jones, 1991, Micheline *et alii*, 2000; Greca e Moreira, 2001; Müller e Wiesner, 2002. Esta corrente de pesquisadores acredita que os modelos clássicos devem ser evitados, pois podem conduzir a erros conceituais. Com isso, há o apontamento para a exclusão da ênfase ao modelo de Bohr (FISCHLER e LICHTFELDT, 1991, 1992). Estes pesquisadores criticam o excesso de tempo despendido com o ensino da “Velha Física Quântica” e propõe, desde o início, a apresentação dos aspectos quânticos sem uso de analogias clássicas.

Outros pesquisadores compõem uma corrente oposta, que defende a utilização dos modelos e analogias clássicas. Estes trabalhos foram realizados por Gil *et alii*, 1988; Carvalho Neto *et alii*, 1988; Gil e Solbes, 1993; Cuppari *et alii*, 1997.

Há também quem defenda o uso de abordagens históricas (KRAGH, 1992; GIL & SOLBES, 1993; FREIRE *et alii*, 1995; PINTO & ZANETIC, 1999) e experimentais (VEIT *et alii*, 1987; LAWRENCE, 1996; CUPPARI *et alii*, 1997; STEFANEL, 1998; VALADARES & MOREIRA, 1998; CAVALCANTE & TAVOLARO, 2001)

Por tudo isso, percebemos que os resultados das pesquisas na área ainda não são capazes de determinar se o uso de modelos clássicos é nocivo para o entendimento dos modelos quânticos. Há tanta discordância que o papel desempenhado pelas analogias clássicas ou o uso de abordagens históricas para o ensino de Física Quântica ainda encontra-se em aberto.

Sendo assim, foi extremamente difícil determinar qual corrente de pesquisa melhor orientaria a criação do curso. Para Greca e Moreira

Caberia perguntar qual destas abordagens é melhor. Resulta difícil dizer. Pode-se ver que cada uma salienta aspectos diferentes, e às vezes até antagônicos, a serem ensinados [...]. (GRECA E MOREIRA, P.14, 2001)

Como dito anteriormente, a carência de um embasamento pedagógico na grande maioria destes trabalhos dificulta ainda mais uma avaliação criteriosa acerca destas abordagens. Com isso, torna-se imprescindível que os aspectos metodológicos do ensino das teorias modernas passem a ser priorizados, pois

Se por um lado, de certa forma, há um consenso em torno dos aspectos quânticos a serem ensinados, a questão metodológica representa um ponto de divergência. Em particular, o papel que a Física Clássica desempenha no entendimento de conceitos quânticos é ainda um ponto bastante polêmico. (OSTERMANN e MOREIRA, p.18, 2002)

Este cenário revela a urgência em se mobilizar um número maior de pesquisadores na verificação da existência de uma ligação direta, ou até mesmo indireta, entre a utilização de modelos clássicos e a criação de erros conceituais, bem como em estudar se esse uso significa a geração de um obstáculo a mais a ser suplantado no ensino de conceitos de FMC.

Em meio há inúmeras dúvidas, a grande guinada surgiu quando percebemos que para o aluno não se sentir desamparado no meio de uma discussão muito técnica era preciso resgatar uma fenomenologia acessível aos estudantes e capaz de ser problematizada. Decidimos que era preciso partir do mais próximo vivenciado por eles

para proporcionar maneiras de que eles avançassem em seus conhecimentos acerca da ciência.

Como nossa intenção era fazer com que os alunos percebessem a natureza estranha dos objetos quânticos, nos perguntávamos se isso seria possível, já que eles ainda não haviam sido apresentados às características dos modelos atômicos clássicos. É necessário, mais uma vez, lembrar que nos países europeus e nos EUA a inserção da FMC já é estabelecida nos programas equivalentes ao nosso Ensino Médio. Com isso, os pesquisadores destes países podem questionar a validade do ensino por meio dos modelos da “Velha Quântica”.

Entretanto, como perceber as diferenças entre as idéias centrais em que se baseiam as teorias clássicas e quânticas se os alunos brasileiros não têm como fazer comparações? É possível que os estudantes percebam as implicações teóricas e filosóficas da FMC desta forma? E as mudanças epistemológicas e culturais, podem ser ressaltadas sem que se mostrem as diferenças entre os modelos da Física Clássica e Física Quântica? Tais perguntas carecem de pesquisas que, no mínimo, apontem para respostas possíveis.

Sem condições de responder ou aguardar pesquisas que dirimissem nossas dúvidas, decidimos ponderar de outra forma. Mais que a escolha de se esgotar ou não os modelos clássicos, nossa decisão foi baseada na definição de um posicionamento epistemológico. Acreditamos que fosse preciso causar o estranhamento nos alunos, revelando outra visão de mundo, mostrando a ruptura profunda causada pela Física Quântica, causando espanto mesmo para quem ainda não estabeleceu contato com o assunto. Os problemas filosóficos da Teoria Quântica só seriam possíveis de serem explorados desta forma.

Assim, decidimos pela utilização da Física Clássica e de modelos semi-clássicos. Sem isso acreditamos que não seria possível gerar o “assombro” relacionado à descrição quântica. Para os físicos a quase “incomensurabilidade” entre ambas as concepções de mundo é natural, já que estão bem inseridos nas estruturas clássicas, de forma que a menor ruptura torna-se evidente. Mas não é isso o que ocorre com os alunos. Por estarem fora da estrutura não conseguem perceber o que mudou, de forma que tudo é aceito sem estranhamento. E pior, de maneira passiva, sem questionamentos. Além disso, como ressaltam Solbes *et alii*, é preciso considerar que

“[...] o uso de modelos e aproximações clássicas ou semi-clássicas (pré-quanticas) é algo freqüente na prática corrente da Física, e os cientistas não se privam de fazê-los sempre que têm oportunidade. Do ponto de vista pedagógico é importante utilizar estes modelos, e pelas mesmas razões que utilizam os físicos. O uso de modelos permite apresentar de forma esquemática e acessível o que outro modo requereria uma descrição complicada, o que tem a virtude de separar os aspectos importantes dos secundários em um determinado problema.” (SOLBES *et alii*, 1987, p.194).

Assim, conduzidos em parte por convicções epistemológicas e pela realidade de nosso sistema didático, optamos pelo alinhamento com as correntes que defendem o uso dos modelos clássicos. Talvez a implementação de um curso ressaltando somente as características quânticas viesse de encontro com nossos anseios pessoais, dado o apreço que temos pelos conteúdos da Teoria Quântica, porém

[...] o valor intrínseco de um conteúdo nunca é suficiente para fundar sua inserção didática, mas esta depende também de um projeto educativo que conduz a uma seleção dentre as várias possibilidades. (ASTOLFI, 1995, p. 51)

Com isso em mente, o trabalho de Arons (1990) serviu-nos de inspiração. Este autor defende a idéia de selecionar alguns tópicos essenciais de FMC, visando apresentar aos alunos uma percepção destes conceitos. Para isso, ele propõe que se busque na Física Clássica somente os elementos essenciais (essa escolha compõe o que ele chama de “story line”) que servirão de suporte para a melhor compreensão dos conceitos modernos selecionados.

A partir desta idéia escolhemos quais tópicos de FMC iríamos transpor para sala de aula: fótons, a quantização, estruturas atômicas modernas, a dualidade onda-partícula e a não-localidade. Esta escolha nos fez determinar quais os saberes clássicos seriam imprescindíveis para o curso: características principais de ondas e partículas, eletromagnetismo clássico e modelos atômicos semi-clássicos. Com isso, pretendíamos gerar as condições necessárias para inserir elementos da Física Quântica no Ensino Médio.

Optamos por mostrar os aspectos fundamentais das entidades clássicas, o comportamento de seus modelos, bem como o processo de criação científica, desde o início do curso. Acreditamos que desta forma é possível que, posteriormente, ao ser apresentado à Física Quântica, o aluno possa, de maneira significativa, perceber as profundas diferenças entre modelos Física Clássica e Física Quântica e, conseqüentemente, as diferenças epistemológicas existentes entre elas.

Optamos, assim, por trabalhar com uma abordagem fenomenológico-conceitual, encontrada no trabalho de Greca e Moreira (2001), que a define como:

Fenomenológica para propiciar a criação de uma nova percepção, e conceitual na medida em que os fenômenos escolhidos devem ser suficientemente simples (elementares) e dirigidos de forma a que a essência semântica dos (primeiros) conceitos envolvidos fique evidente. (GRECA e MOREIRA, p. 446, 2001)

Tal abordagem nos possibilitou a abertura de um leque maior de opções, sendo possível adequar nossa abordagem pedagógica de acordo com o perfil dos alunos que encontramos e com o andamento das aulas. Foi possível discutir o papel da História da Ciência em nosso curso, reservar espaço para as discussões filosóficas que julgaríamos fundamentais, bem como recorrer a recursos didáticos que nos auxiliassem na construção de uma descrição quântica da luz, tais como a utilização de softwares e de experimentos de pensamento.

5.6 – Curso: a estrutura final

Nossa principal intenção era a de que a estrutura por nós criada possuísse uma seqüência didática que culminasse nas implicações filosóficas e epistemológicas geradas pelas interpretações da dualidade onda-partícula³¹. Com isso em mente, seria preciso traçar uma trajetória, buscar o melhor caminho possível para fazer a inserção dos conceitos desejados. Porém, não sabíamos de onde partir. Passamos, então, a procurar quais seriam os “marcadores”³² deste caminho.

Definimos como “marcadores” principais aqueles saberes cruciais para estabelecer as ligações entre os elementos constituintes da nova estrutura que criávamos. Estes saberes também deveriam ser aqueles que, quando analisados sob a perspectiva das Regras da Transposição Didática, estariam mais adequados a serem transpostos e, principalmente, mais aptos a sobreviver nas salas de aulas.

Assim, estes “marcadores” atuaram como pontos de intersecção da nova estrutura gerada, permitindo, por exemplo, refazer os trajetos que unem os conceitos, bem como fornecer indícios sobre outros caminhos. Desta forma, todos os novos conceitos inseridos na estrutura do novo saber, bem como as atividades, devem sempre se adequar a estes marcadores, aumentando as chances de sobrevivência no ambiente escolar.

Um pequeno exemplo pode ser apresentado para ilustrar a busca por estes “marcadores”. Um assunto que inicialmente pensamos em inserir como um “marcador” foi a radiação do corpo negro. Seria possível, por meio deste tema, discutir a idéia de quantização, a relação experiência-teoria e uma série de atividades poderiam ser criadas. Porém, ao avançarmos em nossas reflexões, considerando os aspectos didáticos, achamos que esta discussão seria demasiadamente técnica, correndo um sério risco de não atrair a devida atenção dos alunos. Nosso receio pode ser corroborado pelas afirmações de Jammer, ao narrar o surgimento da Mecânica Quântica:

Foi uma infelicidade que o primeiro problema tratado no desenvolvimento sistemático da teoria quântica foi o da quantização de energia de vibrações

31 Como desejamos que este curso seja replicado por outros professores, elaboramos um pequeno roteiro de aplicação das aulas, na forma de um quadro sintético, contendo todo o material desenvolvido, além de sugestões para melhor seguir nossa seqüência didática. Este material está disponível no anexo que acompanha esta dissertação.

32 O termo marcador foi cunhado durante nossas reflexões sobre a necessidade de buscar novos rumos para a inserção da FMC nas salas de aula. Por tratar-se de um “terreno ainda não desbravado”, nosso trabalho, analogamente, se assemelhava à abertura de trilhas. Com isso, seria preciso deixar marcadores pelos caminhos que criávamos, para indicar se deveriam, ou não, serem posteriormente seguidos.

eletromagnéticas harmônicas. Não há nenhuma dúvida que muito esforço intelectual poderia ter sido economizado por parte dos primeiros teóricos quânticos - como também por parte do leitor do texto presente - se um assunto conceitualmente menos complexo tivesse iniciado o desenvolvimento da teoria. (JAMMER, 1974, p.1)

Isto é, a necessidade de se entender minimamente o papel dos osciladores eletrônicos de Planck nos fez desconsiderá-lo como “marcador”. Não raro, vários cursos universitários se esmeram em tratar extensa e profundamente os osciladores, visando garantir uma maior aprendizagem da Mecânica Quântica. Sendo assim, ficamos receosos de que, sem aporte teórico prévio, este conteúdo poderia se tornar meramente informativo. Em decorrência disso, concordamos que tomar este tópico como abordagem inicial resultaria em fracasso, colocando em xeque o resto da sequência. Mesmo após uma longa discussão não é possível negar que, neste momento, a intuição didática teve um papel determinante em nossa escolha.

Considerando a dualidade onda-partícula como o primeiro marcador que definimos, surge, a partir das reflexões acima, um segundo marcador, o elo de ligação que desejávamos: a análise qualitativa das linhas espectrais. A possibilidade de se analisar a composição da luz emitida pelos corpos teve uma importância fundamental para o desenvolvimento da Física Quântica (JAMMER, 1974). A análise da luz emitida por corpos aquecidos levou à descoberta de novos elementos químicos, possibilitando também o desenvolvimento da química moderna (SEGRÉ, 1982). Assim, acreditamos que a apresentação da espectroscopia no Ensino Médio, por meio da observação dos espectros de emissão, torna-se uma porta de entrada para debates mais profundos acerca da natureza da luz e da matéria. Este marcador também pode fazer com que estas análises se transformem na principal conexão com as discussões envolvidas no desenvolvimento dos modelos atômicos.

Com isso, a idéia central era fazer com que os alunos observassem, com o auxílio de um espectroscópio “caseiro”, o espectro de emissão de diferentes lâmpadas, travando contato com espectros contínuos e discretos. Desta forma, seria possível levar o aluno a se interrogar sobre o que é a luz a partir da análise das cores presentes nos espectros. Pôde-se fazer uma analogia com as impressões digitais, pois não há espectros idênticos para diferentes elementos, sendo possível então identificá-los a partir da análise espectral. Assim, com os espectros discretos observados pelos estudantes nas atividades de espectroscopia, surge a necessidade de haver uma explicação teórica plausível para o fenômeno a eles apresentado.

A partir desta necessidade, teríamos a oportunidade de introduzir os modelos atômicos clássicos e o eletromagnetismo clássico. Com isso, o modelo de Bohr, por exemplo, seria uma resposta possível para entendimento dos espectros discretos observados pelos alunos. Obtivemos, então, mais um marcador: o modelo de Bohr.

Por meio dele é possível que os alunos venham a compreender a idéia de que cada elemento químico possui seu determinado espectro de emissão. Tem-se, neste momento do curso, a oportunidade de discutir as limitações do modelo clássico da emissão de energia eletromagnética. Ao revelar o problema do “colapso do átomo”, devido à perda constante de energia por um portador de carga acelerado, é possível introduzir a noção de quantização proposta por Bohr e, ao mesmo tempo, apresentar uma nova explicação para o fato de um átomo poder ser identificado pela análise espectral.

Todo o estudo da radiação eletromagnética poderia ser retomado, considerando agora o modelo de Bohr. Por meio da discussão do espectro eletromagnético seria possível reforçar a idéia da luz como uma onda. Quando estivessem certos de que a teoria ondulatória era suficiente para explicar a luz, apresentaríamos a necessidade do uso da teoria corpuscular. Deste modo, surge mais um marcador: o efeito fotoelétrico.

Consideramos que a discussão da natureza da luz a partir do efeito fotoelétrico revela-se fundamental para a apresentação da dualidade onda-partícula de forma coerente, inteligível e, principalmente, sem dogmatismo, pois neste momento os alunos têm condições de perceber o impasse gerado por essa explicação totalmente contraditória com tudo que fora estudado até aquele momento. Surge aqui uma ponte entre o clássico e o quântico. Nossa convicção em utilizar o efeito fotoelétrico neste instante é corroborada por Arons, já que este afirma que

Não é possível contar a história de radiação do corpo negro de um modo intelectualmente honesto e significativo em um curso introdutório, e desconsiderar isto somente deixa os estudantes desorientados. O modo claro e inteligível para o conceito de quantum é pelo efeito fotoelétrico, e este é o caminho quase universalmente adotado em textos atuais. (ARONS, 1990, p. 285).

Logo, este marcador é o elo principal com a discussão sobre a dualidade onda-partícula. Surge, neste momento do curso, a crise do modelo ondulatório da luz, até então bem estabelecido para os alunos. Mostramos que após a consolidação da teoria

ondulatória, a detecção do efeito fotoelétrico foi um fator fundamental que desencadeou a necessidade de conceber a luz como partícula, estabelecendo agora o modelo corpuscular. Com isso, foi possível fazer com que os alunos percebessem os profundos esforços científicos realizados na tentativa de compreensão da natureza da luz.

Devemos ressaltar que nossa intenção não é esgotar o modelo clássico, mas, sim, mostrar a ruptura introduzida ao ter que se interpretar a luz por meio de formas tão antagônicas. Com isso, queríamos causar um “choque” no aluno, algo que foi obtido com sucesso, como será apresentado posteriormente.

Cientes de que a discussão filosófica e epistemológica deveria surgir de qualquer forma e de que enfrentaríamos uma série de problemas relacionados com as várias interpretações da Física Quântica, antecipamo-nos e iniciamos o curso com uma atividade sobre modelos e modelização, definido, assim, mais um marcador.

É inegável que os modelos desempenham um papel imprescindível na construção do conhecimento científico. Para Bunge (1973), a modelagem é a essência do processo científico, pois é por meio dos modelos criados que se pode apreender conceitualmente a realidade. Segundo Martinand, os modelos permitem essa apreensão da realidade por possibilitarem a criação de representações do oculto, do que foge aos sentidos, pois *“substituindo as primeiras representações por variáveis, parâmetros e relações entre variáveis, fazem com que se passem a representações mais relacionais e hipotéticas”*. (in ASTOLFI, 1995, 103).

Com isso, é possível encontrar no Ensino das Ciências uma extensa literatura que salienta o papel que desempenham os modelos e o processo de modelagem no domínio didático, sendo assim objeto de diversas pesquisas (GILBERT & BOULTER, 1988, 2000; COLINVAUX, 1988; HESSE, 1966). Entretanto, raramente aborda-se no Ensino Médio, de maneira explícita, o papel dos modelos nas ciências. Desta maneira, desde o início do curso, a discussão do papel dos modelos na ciência e as formas de representação da realidade seriam estimuladas.

Tínhamos, assim, obtido os “marcadores” principais do caminho a ser percorrido pelos alunos: o início: modelos (Bloco I, p.2-8 do anexo); pontos intermediários: espectroscopia (Bloco IV, p.29-38 do anexo); átomo de Bohr (Bloco V, p.39-45 do anexo); efeito fotoelétrico (Bloco VI, p.46-53 do anexo) e a chegada: dualidade onda-partícula (Bloco VII, p.54-62 do anexo).

Entretanto, seria necessário criar um caminho que pudesse conectá-los. Por exemplo, seria preciso conectar a noção de modelo com a dualidade onda-partícula. Assim, logo no início, elaboramos um texto e criamos a atividade denominada “Ligue a TV”, de forma que fosse possível discutir todas as características das ondas e partículas, relacionando-as com a construção dos modelos na física e, ao mesmo tempo, conscientizando os alunos de suas semelhanças, diferenças e, principalmente, da impossibilidade de coexistência destas mesmas características em um só objeto (Bloco II, p.9-12 do anexo).

Da mesma forma, seria preciso construir uma seqüência didática capaz de conduzir aos espectros e que, principalmente, permitisse problematizá-los. Assim, precisaríamos fornecer algumas características de ondas eletromagnéticas e resolvemos abordá-las diretamente pelo estudo da luz, fazendo uma profunda discussão a respeito das cores (Bloco III, p.13-28 do anexo).

Não achamos que seja possível que as características, no mínimo estranhas, deste tipo de saber possam ser incorporadas pelos alunos sem que antes seja feita uma escolha cuidadosa de quais (e, principalmente, como) conceitos básicos da Teoria Quântica serão introduzidos. Além de ter a função de ajudar os alunos a perceber e organizar os fenômenos quânticos, esses conceitos deveriam fornecer o suporte conceitual necessário para que fosse possível percorrer toda a trajetória idealizada por nós (sair dos modelos, passar pelos espectros e chegar na dualidade). Ao mesmo tempo, eles deveriam propiciar aos alunos uma base para que um conhecimento sólido fosse construído.

Assim, algumas atividades foram construídas para fornecer um suporte didático e epistemológico conferindo coerência à nova estrutura conceitual que criamos. Desta maneira, temas secundários, exercícios, textos para leitura, apresentações em Power Point e outras atividades em geral foram inseridos ao longo do curso. Estes são elementos que não se enquadram no que determinamos como marcadores principais, não sendo, portanto, analisados nesta dissertação. Entretanto, são peças fundamentais na composição da trajetória do curso como um todo³³.

Como exposto no capítulo 3, de acordo com a Teoria da Transposição Didática, a re-estruturação do saber requer uma ordem coerente de apresentação, que acaba por desrespeitar a ordem histórica do desenvolvimento científico. Assim, por exemplo, Martinand (1986) mostra este desvio presente na apresentação do efeito-

³³ Estas atividades e temas, ainda que não analisados por nós, encontram-se no material anexo a este trabalho.

fotoelétrico nos livros didáticos franceses. Neles, o trabalho de Einstein parece ter sido elaborado exclusivamente para responder a um problema experimental.

Esta reconstrução histórica é duramente criticada pelos historiadores da ciência, mas, no Ensino de Ciências, esta crítica precisa ser cuidadosamente avaliada. Segundo Whitaker

[...] o método de reconstrução racional parece ser de validade duvidosa para o filósofo. Contudo, pode ser útil no ensino de ciência desde que seja salientado no início que realmente é uma reconstrução: na realidade o processo pode ter, de fato, um benefício adicional ao tornar explícito o modo no qual os cientistas chegaram às suas idéias. [...] Isto não deveria ser confundido com “quasi-história” que não admite que houve uma reconstrução. (WHITAKER, 1979, p.109-110)

Na construção de nosso curso, foi necessário que fizéssemos desvios cronológicos. Por exemplo, a questão da quantização proposta por Planck aparece, de alguma maneira, no próprio átomo de Bohr. Ou seja, apresentamos Planck através de Bohr, havendo aqui uma inversão histórica importante. Na nova estrutura do Saber a Ensinar, para o seu tempo didático, o átomo de Bohr vem antes da quantização de Planck. Essa diferença é fruto das mudanças dos estatutos epistemológicos. Tais afastamentos *“devem ser compreendidos igualmente como a inevitabilidade da transposição didática.”* (ASTOLFI e DEVELAY, 1995, p.51). Assim, foi necessário que fizéssemos tais desvios, pois o nosso compromisso era com os marcadores. Os outros saberes e atividades são inseridos de forma que possam fazer sentido dentro da nova estrutura gerada, mesmo que estes não estejam historicamente conectados na ordem por nós exposta. Desta forma,

[...] as transformações sofridas na escola pelo Saber Sábio devem ser interpretadas menos em termos de desvio ou de degradação [...] Pois, reunindo um currículo, todo conceito científico se integra numa nova economia do saber: ele deve poder designar alguma que possa ser aprendida[...]. (ASTOLFI e DEVELAY, 1995, p.52)

Assim, a estrutura que será apresentada aos alunos é uma estrutura regida também por uma lógica didática. Porém, o aluno deve, explicitamente, saber que os elementos desta estrutura estão dispostos fora da ordem de seu desenvolvimento. E, é preciso que ele perceba que isso foi feito para criar uma seqüência plausível, necessária para ser mais facilmente apreendida. Deste modo, ela se torna uma seqüência artificial, mas que cumpre objetivos pedagógicos.

É preciso deixar bastante claro que durante o desvio histórico que fizemos não deixamos de exercer nossa “vigilância epistemológica”. Ou seja, fizemos questão de enfatizar as características não-lineares do desenvolvimento científico. Os alunos foram explicitamente informados sobre a linearização aparente a eles apresentada como resultado de uma busca de ordem, visando o melhor entendimento dos conceitos. Desde o início do curso (com a idéia de modelos) deixamos claro que o processo de desenvolvimento da ciência não ocorre desta maneira, que esta seqüência ordenada, “certinha”, tinha apenas um caráter didático.

Durante as reflexões que guiaram a construção do curso agora apresentado, estávamos cientes de que

A Transposição Didática tem sua utilidade, seus inconvenientes e seu papel para a construção da ciência. Ela é inevitável, necessária e de certo modo, lamentável. Ela deve ser colocada sob vigilância. (BROUSSEAU, 1986)

Assim, atentos aos complexos processos de mudanças sofridos pelos saberes, acreditamos que foi possível oferecer um ambiente em que a Física Quântica pôde ser apresentada de forma menos dogmática que aquela apresentada nos livros didáticos. Também buscamos criar atividades que fornecessem espaços para discussões, com o intuito de minimizar a imagem neutra da Ciência. Procuramos, ainda, criar uma nova estrutura, em que houvessem conexões lógicas entre os saberes, buscando facilitar a aprendizagem, bem como mostrar uma seqüência que rompesse com a visão empirista da ciência.

Com isso, criamos uma estrutura capaz de gerar uma seqüência didática na qual o estudante pôde ser apresentado de forma coerente, plausível e inteligível aos saberes relacionados à FMC. Esta re-estruturação foi muito além da mera apresentação desconectada de resultados finais obtidos com o progresso da ciência.

6. Transposição Didática: um olhar sobre a Física Quântica

6.1 – A análise dos dados

Neste capítulo apresentaremos, à luz da Transposição Didática, a análise dos dados obtidos na pesquisa. Centraremos nossa análise nos cinco principais marcadores por nós definidos no capítulo anterior. São eles: modelos, espectroscopia, átomo de Bohr, efeito fotoelétrico e dualidade onda-partícula.

O objetivo desta análise é tentar encontrar em nossos marcadores as características indicadas pela Transposição Didática como relevantes para que um determinado saber possa instaurar-se no Saber a Ensinar, ou seja, para que ele possa figurar nos livros didáticos e nas salas de aulas³⁴. Também checaremos se os marcadores escolhidos respeitam as cinco regras da Transposição Didática³⁵, e faremos uma análise crítica da adequação destas regras aos conteúdos de FMC.

É preciso alertar para o fato de que, em maior ou menor grau, todas as características ressaltadas pela Transposição Didática podem ser encontradas em qualquer um dos saberes trabalhados, de forma que suas regras são aplicadas a todos os marcadores. Acreditamos que a maior contribuição deste trabalho encontra-se em discutir a adequação destas regras aos temas de FMC, e não em sua aplicação direta nos saberes analisados, visto sua ampla margem de aplicabilidade. Assim, para não nos estendermos demais, optamos por relatar somente as análises efetuadas sobre características e regras que mais possam contribuir para indicar possibilidades de inserção e, principalmente, de sobrevivência no contexto escolar dos conteúdos de Física Quântica abordados em nosso trabalho.

34 O saber efetivamente transposto deve ser: **Consensual**, **Atual** (moral e biologicamente), possuir uma certa **Operacionalidade**, ser fruto de uma **Criatividade Didática** e ter passado pela **Terapêutica**, como visto detalhadamente no capítulo 3 do presente trabalho.

35 As regras da Transposição Didática são: **Regra I** – Modernizar o Saber; **Regra II** – Atualizar o Saber; **Regra III** – Articular o Saber novo com o velho; **Regra IV** – Transformar um Saber em exercícios e problemas; **Regra V** – Tornar o conceito mais compreensível, como foi apresentado detalhadamente no capítulo 3 do presente trabalho.

6.2 – A análise dos marcadores

MARCADOR I – MODELOS:

Como já exposto, raramente aborda-se no Ensino Médio, de maneira explícita, o papel dos modelos nas ciências. Como os modelos e o processo de modelagem têm importância fundamental na construção da Física, cremos que seja extremamente relevante para o Ensino de Física convidar os alunos a refletirem sobre o assunto. Para iniciarmos tais discussões, realizamos com os alunos a atividade da “caixa-preta”.

1.1 Descrição da atividade:

Foi entregue aos alunos uma pequena “caixa-preta” de papelão, com dois palitos, um em cada lateral, unidos entre si por meio de um sistema de transmissão de forças que não poderia ser visto por eles. A professora que aplicou o curso não participou da construção da caixa, de modo que ela, assim como os alunos, não conhecia o mecanismo interno.

A atividade foi constituída da seguinte forma: o aluno manuseava a caixa e constatava que cada vez que movimentava um dos palitos, o palito da lateral oposta “respondia” ao movimento feito por ele. Após todos os alunos manusearem a caixa, lhes foi pedido que desenhassem como deveria ser o sistema que possibilitava o movimento conectado dos palitos.

Ao terminarem os desenhos, cada um dos alunos mostrou seu sistema à turma, descrevendo-o e explicando seu funcionamento. Após todas as apresentações, uma grande discussão foi gerada para que se fosse considerada a plausibilidade de cada sistema apresentado. Durante a discussão, os alunos começaram a questionar se poderia haver uma “certeza” sobre como era o sistema que estava contido na caixa e, assim, determinar quem teria acertado. Findada a discussão, foi apresentado aos alunos o texto “O que são os modelos?”, presente no Bloco I (p.2-8 do anexo)

1.2 A análise

Podemos encontrar presentes neste conteúdo algumas das características ressaltadas na Transposição Didática para a inserção de um “novo” saber no contexto escolar. Obviamente não queremos dizer que modelos e processos de modelagem são específicos aos temas de FMC, pois a atividade aqui relatada poderia ser realizada para abordar o assunto também na Física Clássica. Entretanto, como já dito,

este é um tema raramente abordado nas salas de aula, podendo, assim, ser considerado como “novo”.

Mesmo sendo um conteúdo cuja discussão, geralmente, pertence a uma outra área do Saber Sábio (a Filosofia e Epistemologia da Ciência) este desempenha um papel fundamental na nova estrutura montada para a apresentação dos conceitos de FMC no curso que criamos. Desta forma, o analisaremos como parte constituinte dos saberes que inserimos no contexto escolar, sem dedicar-lhe um tratamento diferenciado apesar de não se tratar de um conteúdo físico. Assim, este saber agora transposto para a sala de aula é fruto de uma **Criatividade Didática**, visto a necessidade da criação de um novo objeto de ensino, que deve ser capaz de gerar atividades e avaliações.

A **criatividade didática** está, neste caso, fortemente vinculada à dificuldade de se produzir modelos familiares em FMC, e também é determinante no momento de transpor para as salas de aula a função dos modelos na ciência. Visando utilizar toda a riqueza de discussões que podem surgir, optamos por trabalhar com esse marcador de uma forma que focasse especialmente o processo de modelagem. Além disso, a atividade da caixa-preta possui uma dimensão lúdica e desafiadora, importante para o processo de ensino-aprendizagem.

Em nossa análise, percebemos que a **Operacionalidade** desempenha um papel fundamental na inserção deste marcador no contexto escolar. O tipo de operacionalização tradicional é centrado nos conteúdos, nos produtos da ciência. Contudo, consideramos que este marcador exigia uma outra forma de **operacionalidade**. Iremos, assim, apresentar as nuances envolvidas nesta que é uma das características mais determinantes para a sua inserção efetiva no Ensino Médio.

Com relação ao marcador agora analisado, podemos dizer que, por se tratar de um conteúdo passível de amplas abordagens, surge uma profunda dificuldade em se estabelecer critérios rígidos e objetivos para a conceituação de exercícios e atividades para o aprofundamento do tema. Parece-nos que este fato, aliado à condição deste tipo de saber propiciar atividades e exercícios que não privilegiem uma única resposta considerada como correta, influenciou sobremaneira o comportamento dos alunos.

Foi possível perceber certo estranhamento dos estudantes com a possibilidade de poder falar aquilo que pensavam de uma forma livre, sem utilizarem uma resposta pré-concebida. Concomitantemente, surgiu um desconforto no momento

em que perceberam a não existência de uma resposta única. Merece destaque outra reação advinda da especificidade desse saber: a indignação demonstrada pelos alunos ao se darem conta de que a professora, naquele instante, também não era a “detentora” da resposta procurada.

Assim, de forma a deixarmos claras as reações que observamos nos alunos ao travarem este primeiro contato com uma outra forma de operacionalização, centrada no processo e não no produto, começamos por relatar alguns momentos da primeira aula:

A professora (Prof) inicia a aula mostrando a caixa-preta aos alunos (A) e explicando seu funcionamento.

Prof: Temos aqui uma caixinha com uma coisa muito interessante. Se a gente mexe com o palitinho de um lado, mexe o do outro. O que vocês acham que está acontecendo aqui dentro?

(Enquanto a professora mostra a caixa, os alunos conversam entre si sobre seu funcionamento)

A1: Eles estariam ligados um ao outro, professora? Poderia também ser o ar que tá lá dentro.

Prof: Vocês acham que o ar que está lá dentro consegue fazer isso?

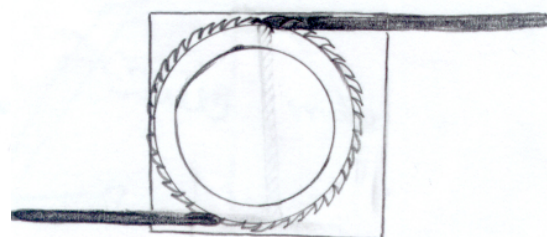
A2: Não. É o mesmo palitinho

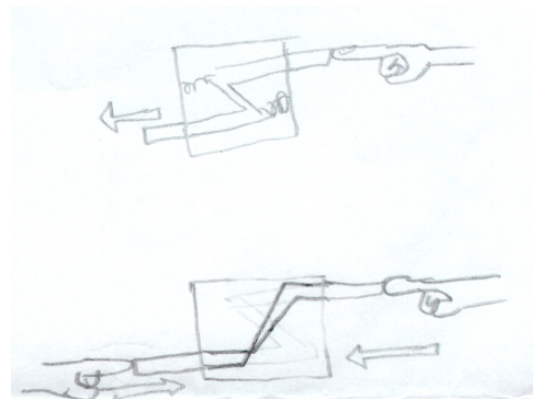
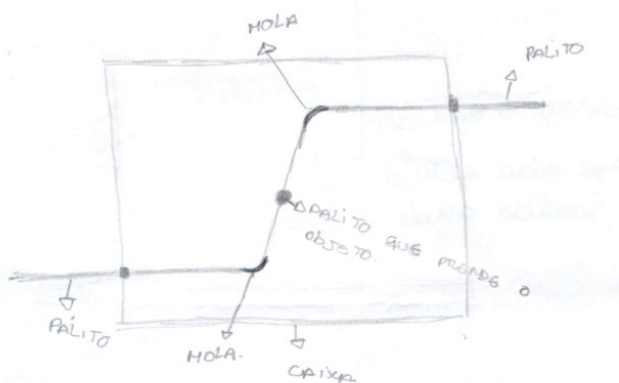
Prof: É o mesmo palitinho?

Alguns alunos: Não.

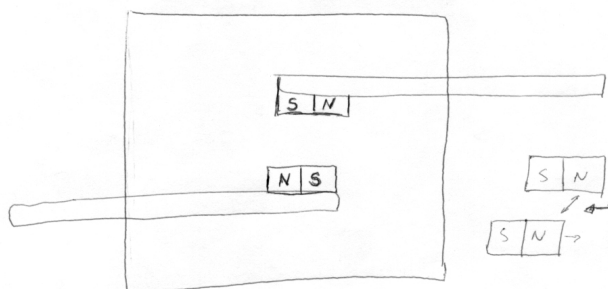
Prof: O que a gente tá fazendo outra vez? Hipóteses, hein?

Como havia uma única “caixa-preta” disponível, esta foi passada de mão em mão. Os alunos a manusearam para poderem tecer suas hipóteses, porém, muitos deles, mesmo antes de a pegarem, começaram a fazer conjecturas sobre seu funcionamento. Assim, mesmo sem a caixa, vários desses alunos desenharam o sistema interno, de forma que várias hipóteses diferentes foram criadas, como mostramos nos exemplos abaixo:





Após o término da aula, alguns alunos continuaram na sala discutindo como seria o funcionamento da caixa. Ainda que muito pontual, este comportamento é um indício relevante para a **terapêutica**, mostrando um relativo “sucesso” da atividade entre os alunos. Um deles, por exemplo, defendeu suas hipóteses, discutindo com a professora por mais de 10 minutos após o final da última aula do dia. Ele, então, foi para o quadro negro e desenhou um engenhoso, e até coerente, sistema com ímãs, que depois foi reproduzido no papel:



Entretanto, mesmo com uma intensa participação, os alunos sentiram uma grande desconfiança ao não se verem diante da condição de escolha de uma resposta tida como correta. Com isso, ficaram incrédulos com o fato de poderem se posicionar livremente. Foi muito comum que diversos alunos se dirigissem até a professora com a mesma pergunta: “posso pôr o que eu quiser como resposta? Tem certeza? Posso pôr mesmo?”. Este fato pode ser ilustrado pelo seguinte trecho gravado:

A3: Professora eu posso pôr aqui o que eu acho?

Prof: Pode pôr o que quiser. A imaginação é sua. Gente essa pergunta não tem certo e errado, concordam? É para usar a cabeça, a imaginação. Com lógica, né?

Prof: Olha gente. Se vocês tiverem mais de uma idéia, ponham as duas no papel.

(Uma aluna pergunta se tem uma bola dentro da caixa.)

Prof: *Se você acha que é uma bola, faça uma bola.*

Porém, os alunos não se desvinculavam da idéia da existência de uma única resposta que tinham de adivinhar para acertarem e, assim, passaram a buscar pistas que os levassem a ela. Com isso, mesmo a professora, a todo o momento incentivando os alunos a se expressarem livremente sobre o que achavam que existia dentro da caixa, eles acabaram por tentar buscar a resposta correta:

A3: *Tem uma madeirinha ligando eles?*

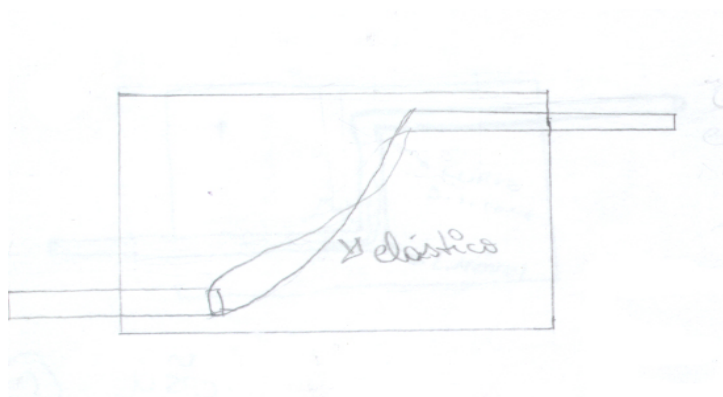
A1: *Tem ar com pressão diferente dentro da caixa?*

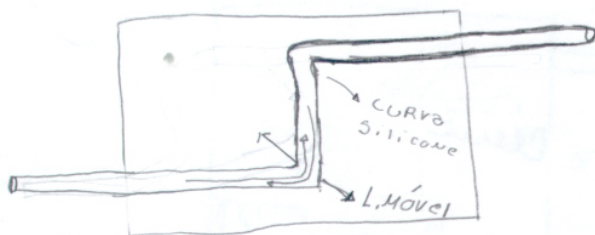
Prof: *Eu não sei o que tem dentro.*

A1: *Dá sua opinião, pô!*

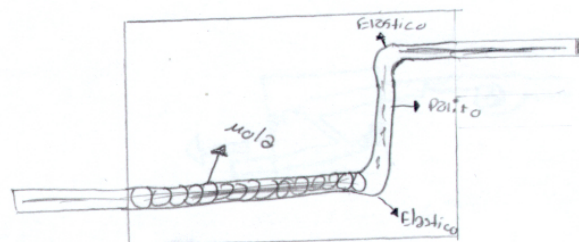
Prof: *É alguma coisa elástica.*

Esta necessidade em tentar responder aquilo que crêem ser o que a professora gostaria de ouvir pode ser também exemplificada pelo seguinte episódio ocorrido na aula: o fato de a professora não ter participado da construção da caixa-preta deixou-a também curiosa em saber como era o funcionamento de seu sistema interno, de modo que ela também procurou desvendar o que havia em seu interior. Assim, falou rapidamente que deveria haver um elástico no mecanismo que movimentava os palitos. Com isso, ela acabou gerando uma resposta, fornecendo uma “suposta” pista para alguns alunos. Os que ouviram esta “dica” desenharam um sistema que contivesse, de qualquer forma, um elástico.





Modelo do aluno antes da “dica”, sem o elástico.



Modelo do aluno depois da “dica”, agora incorporando o elástico.

Como não estavam satisfeitos por não saberem o que havia dentro da caixa, os alunos pressionaram excessivamente a professora para que ela “desvendasse o segredo”. Assim, ela confessa que não sabia qual era o funcionamento do sistema conector dos palitos, pois não participara de sua confecção. Logo, da mesma maneira que eles, não fazia idéia de seu conteúdo. Este fato pareceu incomodar profundamente os alunos, e gerou uma série de protestos. Um deles é ilustrado nas falas abaixo transcritas:

A6: Professora, como você me mostra uma coisa que você não sabe como funciona?

A4: Que absurdo! Por isso o Brasil não vai pra frente.

A6: Se nem você sabe como é a caixa preta, como eu vou saber isso?

Com o término da aula, os alunos pediram que a caixa fosse aberta para que checassem qual seria realmente o sistema correto. Diante de tamanha pressão, a professora se atrapalhou e finalizou a aula dizendo que traria a caixa para ser aberta na aula seguinte. Entretanto, após perceber que não poderia de forma alguma revelar o conteúdo da caixa-preta, pois isso implicaria em mostrar a possibilidade de um acesso direto à realidade, a professora inicia a aula subsequente dizendo que a caixa fora roubada. Sob protesto, os alunos acabaram por se resignar, porém até o final daquele ano eles reivindicavam saber que havia no interior da caixa.

Ressaltaremos agora aspectos que chamaram-nos a atenção quando da análise feita na primeira prova aplicada, cerca de quarenta dias após apresentação deste marcador. Esta prova (p. 64 do anexo), que constava de 8 questões e abordava vários temas já discutidos em sala de aula, trazia a seguinte questão acerca dos modelos e sua relação com a teoria e fenômenos físicos:

Questão 5: Leia o texto abaixo:

“O arco-íris é um fenômeno que sempre encantou a humanidade e despertou sua curiosidade. Vocês viram que a luz do sol ou de uma lâmpada, ao passar por um prisma, ela é decomposta em várias cores, do vermelho ao violeta, semelhante a um arco-íris. A Física utiliza um modelo que considera a luz branca como uma mistura de todas as cores”.

Você acha que esse modelo para a luz mostra realmente o que acontece? A luz realmente é assim ou é essa é só uma boa explicação para esse fenômeno? Justifique sua resposta.

Com relação à questão acima, inicialmente foi possível encontrar alguns padrões de resposta que consideramos como indícios da necessidade de colocar algum tipo de resposta objetiva. Assim, destacamos o fato de a maioria dos alunos optar por fornecer como resposta à questão uma explicação do fenômeno da dispersão da luz, ao invés de expressar sua posição pessoal acerca da relação modelo-realidade, como pode ser visto nas seguintes frases selecionadas:

P₁(5)1 – a luz é a mistura de todas as cores, formando a branca, vêm assim direto do sol, quando separos a luz vemos todas as cores. No caso do arco-íris o “prima” são as gotículas de chuva.

P₁(5)2 – a luz é assim. Composta por todas as cores, mais nos objetos, um tipo de cor sai mais e as outras cores ficam “inativas”. Tipo uma maçã sai mais o vermelho e as outras cores não aparecem, mas estão contidas na luz.

P₁(5)3 – sim, pelo que foi mostrado em sala, foi possível perceber que a luz branca é composta de todas as cores e é por isso que quando ela reflete em algo, podemos distinguir a sua cor.

A quase totalidade dos alunos respondeu toda a prova (25 dos 38 alunos que a realizaram), mesmo fornecendo respostas erradas. Todavia, observamos um aspecto interessante: a questão mais deixada sem resposta foi exatamente a questão de número 5 (oito dos alunos responderam toda a prova, com exceção desta pergunta. Outros três alunos a deixaram sem resposta juntamente com outra questão).

Acreditamos que este comportamento pode ser resultado da insegurança e incredulidade dos alunos sobre a possibilidade de se posicionarem pessoalmente ao responder uma questão de Física. Porém, também consideramos a hipótese de que tal

atitude pode ser uma tentativa de adequação ao modelo de correção que estão acostumados e ao tipo de operacionalidade que já conhecem. Com isso, os alunos devem acreditar que ao agir como de costume terão mais chances de obter sucesso.

Contudo, encontramos nos trabalhos de Brousseau (1986) elementos que permitem uma maior compreensão deste comportamento. Os alunos e professores se relacionam em uma espécie de “contrato” no processo de ensino-aprendizagem. Esta relação apresenta algumas regras, implícitas e explícitas, que têm como objetivo determinar o papel de cada um no processo de aquisição do saber. Com isso, pode-se estabelecer, por exemplo, quais são as responsabilidades de cada “contratante”, na tentativa de se construir estratégias que tornem a aprendizagem possível.

Já nas aulas iniciais, esse contrato se estabelece. Por estarem imersos em um contexto histórico e social, influenciado por fatores internos e externos, professor e alunos criam uma série de anseios e expectativas. Ao analisar a relação didática existente no processo de apropriação do conhecimento, Brousseau (1986) identifica uma série de comportamentos que são regidos por estas “regras do contrato”. Como tais regras se parecem com cláusulas de um contrato preestabelecido pelo professor e aluno, ele cunha o termo Contrato Didático.

Há, então, um conjunto de normas que regulam a relação existente entre o professor, o aluno e o conhecimento. Estas regras ditam quais são os papéis a serem desempenhados por cada jogador, isto é, elas definem as responsabilidades e obrigações de cada integrante nas situações de ensino. Assim, há no cotidiano da sala de aula um conjunto de expectativas dos participantes, definidas a priori, nem sempre de modo explícito, que se traduzem como cláusulas do Contrato Didático estabelecido.

A prática pedagógica tradicional no ensino da Física é centrada no professor como um transmissor do conhecimento. Ele cumpre seu contrato por meio de aulas expositivas, em que são propostos problemas e exercícios de uma parte do conteúdo previamente selecionada. Geralmente, estes exercícios são numéricos e de resposta única, de modo que o aluno possa encontrar a solução que ele espera para o problema. Assim, cabe ao aluno cumprir seu contrato, resolvendo estes exercícios de maneira independente de sua compreensão do conteúdo. Caso ele não encontre a resposta esperada pelo professor, este deve auxiliá-lo de modo que o conduza a esse resultado. Logo, o professor administra sua relação didática para satisfazer as exigências do Contrato Didático, enquanto o aluno cumpre seu contrato ao tentar

realizar o exercício ainda que não disponha do conhecimento necessário para sua realização.

Como o ensino tradicional da Física freqüentemente se utiliza de exercícios com solução única e, preferencialmente, numérica, o aluno passa a considerar este tipo de operacionalidade como uma cláusula do Contrato Didático. Com isso, procura ansiosamente tentar responder aquilo que o professor deseja ouvir, como exposto no episódio em que o aluno ouve a professora dizer que pensava que existia um elástico dentro da caixa. Esta tentativa, na maioria das vezes, torna-se uma busca incessante e irrefletida pela resposta do exercício, solapando a criatividade do aluno e o seu prazer em se relacionar com o conhecimento físico.

O professor tem o papel de mediar a relação entre o aluno e o Saber Ensinado. Este gerenciamento do saber por parte do professor gera no aluno um sentimento de confiança, visto que este acredita que professor saberá adequar o grau de exigência do conteúdo e, principalmente, que ele detém a solução para todos os exercícios e problemas propostos nas aulas. Este sentimento de confiança é uma das principais bases de sustentação do Contrato Didático. Logo, o tipo de operacionalidade que utilizamos pode vir a fazer com que os alunos percam essa confiança necessária no processo de ensino-aprendizagem.

Com isso, os pesquisadores e a professora também encontraram dificuldades e insegurança. A falta de um critério objetivo para a avaliação das respostas levou-nos a uma profunda reflexão sobre o quê esperávamos como resposta correta. Assim, optamos por criar condições para que a professora pudesse, de forma mais liberal possível, escolher seus critérios de avaliação, pois não queríamos causar qualquer espécie de problema para sua prática em gerir o dia-a-dia de suas aulas. Tampouco gostaríamos de obrigá-la a criar critérios de avaliação que diferissem demais dos moldes adotados na escola e que assim a levasse a entrar em conflito com os outros professores. Com isso, após nossas reflexões, a professora optou por seguir a forma de conceituação adotada por quase todas as outras disciplinas, que consiste em considerar uma resposta como correta, parcialmente correta ou errada.

Considerando a prática e experiência da professora em avaliar seus alunos, ela optou por privilegiar a forma de argumentação utilizada por eles. Desta maneira, ela preferiu considerar aqueles que optaram por explicitar seus posicionamentos, mesmo cometendo alguns deslizes conceituais durante sua explicação. Após a correção, a professora refazia as questões com os alunos, ressaltando e reparando os

eventuais equívocos por eles cometidos. De forma bastante sumária, os critérios que guiaram a correção da professora podem ser assim descritos:

Errada: a resposta era assim considerada quando o aluno respondia com algo que não dizia respeito ao solicitado na questão, quando utilizava conceitos físicos de maneira errada ou quando, simplesmente, não respondia à pergunta.

P₁(5)4 – sim. O átomo

P₁(5)5 – Isso ocorre por causa da mistura delas.

P₁(5)6 – sim porque quando ela reflete em alguma coisa amarela é porque o objeto absorve mais o amarelo do que as outras cores.

Parcialmente correta: a professora considerava nesta categoria aquelas respostas com o mínimo de posicionamento pessoal, que não envolviam erros conceituais, mas que pecavam pela fraca argumentação.

P₁(5)7 – sim, porque o arco-íris mostra as cores que existem.

P₁(5)8 – sim, porque já foram feitos os testes.

P₁(5)9 – essa é uma boa explicação para esse fenômeno.

Correta: aqui foram consideradas as respostas que continham uma forma de argumentação mais coesa, que melhor defendesse a posição escolhida pelo aluno.

P₁(5)10 – Esse modelo ajuda a entender o que ocorre. Essa é uma boa explicação para esse fenômeno, pois a luz branca sendo a mistura de todas as cores, ao ser “separada” (pelo prisma), demonstra alguma das cores que a constituem.

P₁(5)11 – para mim é uma boa explicação, porque ninguém pode querer imitar o que acontece na natureza, a semelhança pode ser muito grande mais não fica igual.

P₁(5)12 – eu acho que sim, porque quando ocorre um arco-íris (quando tem chuva e sol ao mesmo tempo ou quando direcionamos um jato d’ água na direção da luz do sol) a água serve como um prisma, que quando a luz do sol a atravessa, a luz branca se decompõem nas cores do arco-íris. Eu acho que a luz é assim e explica o fenômeno.

Encontramos bastante dificuldade em compreender algumas respostas, portanto foi imprescindível para a avaliação a conversa da professora com os alunos após a correção da prova, discutindo esses casos pontuais. Uma dessas questões pode ser encontrada abaixo:

***P₁(5)13** – os dois. A luz contém as cores primárias referentes a luz e não as cores de tinta, assim ela pode fazer um arco-íris tranquilamente. Tanto a luz é assim, como a explicação para esse fenômeno. Se a luz não tivesse essas cores esse fenômeno ainda poderia existir. Se colocarmos a água que sai da mangueira em direção a luz do sol (que é branca) ela formará um arco-íris.*

Observamos claramente que, como esperado, podem-se encontrar diversas respostas que se remetem a uma visão positivista e empirista da ciência. Inúmeras delas utilizam como justificativa a crença na autoridade dos físicos, dos experimentos e, até mesmo, das próprias aulas.

***P₁(5)14** – Sim, mostra realmente o que ocorre. A luz, **segundo os físicos**, realmente é assim e a luz branca é um misto de todas as cores, por isso, quando passa por um prisma vemos todas as cores.*

***P₁(5)15** – eu acho que é assim realmente **visto que à várias experiências que confirmam isto** como um simples disco colorido que se girado considerando ter várias cores ficará branco.*

P₁(5)16** – sim, **porque já foram feitos os testes.

***P₁(5)17** – com base no que **vimos em classe**, a luz branca é realmente uma mistura de todas as cores.*

Assim, as respostas para a questão 5 da prova revelam a necessidade de uma modernização relacionada à visão de ciências presente no Saber a Ensinar. Como afirma Alves-Filho:

O professor deve buscar a criação de um ambiente que favoreça o rompimento com a imagem neutra e empirista da Ciência. Imagem que é perpassada através dos manuais e livros didáticos. (ALVES-FILHO, 2000, p.234)

Com isso, podemos dizer que este marcador tem características passíveis de satisfazer a necessidade de **modernizar o saber (Regra I)**, visto que não parece fazer sentido apresentar a ciência de uma forma tão deformada. Em termos das

características do Saber a Ensinar, apontados por Chevallard, pode-se entendê-lo como uma **atualização biológica** e, ao mesmo tempo, **moral**. Biológica, pois está mais próxima com o fazer do cientista em seu cotidiano. Moral, pois permite aprender aspectos da ciência não disponíveis na sociedade em geral (mídia escrita, televisiva etc.)

Desta forma, inicialmente, este saber estaria apto a propiciar uma modernização do Saber a Ensinar relacionado à visão de ciência transposta para as salas de aula. Assim, esse conteúdo pode ser um meio capaz de começar a modernizar os saberes dentro do âmbito dos conteúdos de Física. Cremos fortemente na possibilidade de se tornar uma porta de entrada para os conceitos de FMC, contribuindo para a realização da modernização almejada do currículo de Física. É preciso ressaltar que neste caso o que foi transposto foi o processo, revelando que o conhecimento científico é extremamente rico, possuindo características que vão muito além do produto.

Com relação ao que foi aqui relatado acerca da operacionalidade, acreditamos que a **Regra IV** não pôde ser contemplada de maneira estrita, no sentido que esta regra é centrada na construção de atividades e exercícios que forneçam respostas objetivas, binárias, do tipo certo-errado. Entretanto, ainda assim foi possível a criação de exercícios e atividades ligadas ao marcador modelos, porém com outra forma de operacionalidade (sem resposta única), diferente daquela plasmada na transposição didática dos conceitos de Física Clássica.

Com relação a este marcador, para não recairmos em um ensino meramente informativo, parece haver a necessidade de se rever essa regra, no sentido de que torna-se extremamente complicado estabelecer respostas rígidas, do tipo certo/errado para a correção da gama de exercícios que podem ser gerados. Assim, esta dificuldade faz com que a participação e o empenho dos alunos, bem como o processo de avaliação, fiquem comprometidos.

Outro fator analisado foi se esse marcador poderia propiciar a produção de textos que pudessem diminuir a dificuldade de compreensão do conteúdo. De acordo com a **Regra V**, que ressalta a importância de um conceito se tornar mais compreensível, tentamos levantar evidências da imbricada relação entre o texto produzido, sua linguagem e o entendimento dos alunos.

Geralmente, por se tratar de um saber que envolve a dimensão epistemológica, os modelos, seu papel nas ciências e o processo de modelagem ficam

fora do currículo oficial. Estes saberes, quando presente nas aulas, são apresentados aos alunos de forma pronta como se, por exemplo, os modelos não existissem e as representação fossem imutáveis, cópias da realidade. Assim, na tentativa de apresentarmos este conteúdo de uma forma diferenciada, a idéia de modelo foi introduzida de uma forma lúdica e didática. Acreditamos que o texto produzido cumpre a Regra V, visto que pôde ser elaborado em uma linguagem adequada aos estudantes, fugindo dos jargões e termos específicos da área. Foi possível perceber que a grande maioria dos alunos conseguiu estabelecer relações entre a atividade da caixa-preta e o texto, como pode ser visto nas respostas de alguns alunos ao exercício presente no texto “O que são modelos?” (p.4 do anexo).

Questões:

1 - Como você definiria o que é um modelo?

2 - De acordo com o texto, o que você entendeu por modelo?

3 - Qual seria, então, o seu papel na Física?

4 - Você vê alguma conexão entre este texto e a atividade com a caixa-preta?

Se estas conexões existem, quais seriam???

E₁(4)1 - A experiência com a caixa preta nos faz pensar em como funcionava a caixa, e para expressar de um modo ideal fazemos um “modelo” sobre ela.

E₁(4)2 - Sim, existe uma conexão. A caixa era o objeto, e os desenhos eram os modelos para tentar descobrir o que havia dentro da caixa-preta.

E₁(1)2 - modelo é o “rascunho”, um projeto que você tem em mente e quer passar para a realidade construí-lo.

E₁(4)3 - sim, nós tivemos que fazer um modelo “imaginário” do que haveria na caixa-preta, assim como fazemos modelos dos átomos, das partículas, etc.

Mesmo que nesse momento não estejamos focando a aprendizagem, podemos afirmar que a quase totalidade dos alunos entendeu o significado da atividade proposta, bem como conseguiu compreender a idéia de modelo e modelagem na ciência. Podemos ilustrar nossa afirmação por meio do relato de um episódio ocorrido em sala de aula. Após dizer aos alunos que a caixa-preta fora roubada, um dos alunos (A4), que aprendeu técnicas de torneiro mecânico no Senai, se propôs a fazer outra. No desejo de criar a mesma atmosfera de suspense, disse que ao terminá-la também não revelaria o mecanismo. Nesse momento, um outro aluno faz o seguinte comentário:

A5: *Aí, essa não vai ser mais a mesma caixa...a tua caixa não vai ser igual.*

Pensando que este comentário foi feito com o intuito de questionar sua habilidade em construir a caixa, o aluno-torneiro diz que sabe muito bem como fazê-la. O outro aluno então explica que o motivo da caixa não poder ser igual não estava relacionado aos conhecimentos manuais, mas sim por não saberem realmente seu conteúdo, logo, mesmo construindo outra caixa que funcionasse de maneira semelhante, esta não poderia ser dita como idêntica a que havia sido roubada. Eles acabam a discussão revelando a compreensão do ato da modelagem:

A4: *É, a gente fez um modelo da caixa preta.*

A5: *A gente idealizou a caixa preta.*

A5: *Modelo é a perfeição do momento.*

A4: *Modelo é uma tentativa de atingir a perfeição.*

Porém, também encontramos, inicialmente, algumas respostas em que os estudantes confundiam a noção de modelo com o próprio objeto a ser modelado, assim como alguns alunos se apegaram demais à idéia de que modelos são apenas visuais. As frases abaixo foram selecionadas ainda durante a primeira atividade.

E₁(4)4 - *sim, a caixa-preta foi um modelo para que nós pudéssemos efetuar a atividade.*

E₁(4)5 - *a caixa preta era um modelo, que servia para demonstrar como o palito, quando o outro era empurrado o outro saía, tivemos que imaginar o que havia dentro dela.*

E₁(4)6 - *modelo é uma tentativa visual de expressar suas idéias.*

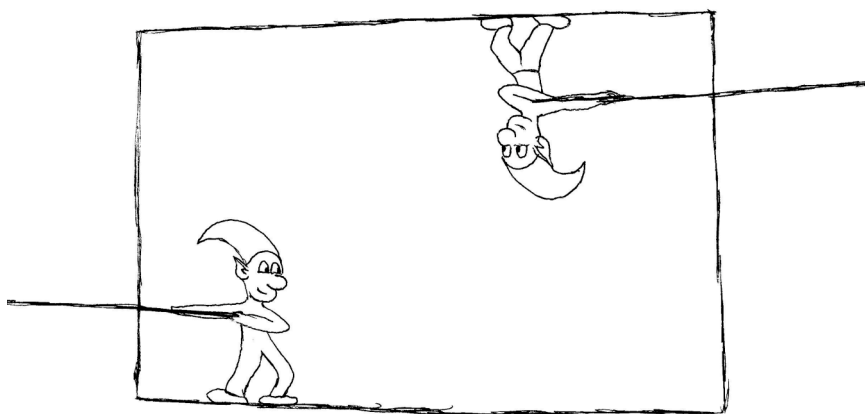
Vale à pena ressaltar que esta atividade foi lembrada e citada pelos alunos no decorrer de todo o curso. Desta forma, de acordo com a **terapêutica** definida pela Transposição Didática, podemos dizer que esta atividade e, por conseguinte, seu marcador, obtiveram um excelente sucesso, em termos conceituais, de motivação e curiosidade. Pudemos perceber que, de maneira totalmente espontânea, vários alunos fizeram conexões entre a caixa e outros conceitos, como o modelo atômico de Bohr e a dualidade onda partícula, mesmo que estes conteúdos tenham sido apresentados meses depois da introdução ao processo de modelagem, como pode ser visto no episódio relatado abaixo.

Durante a última aula, nove meses depois da apresentação deste marcador, se discutiu a relação entre modelo e realidade e os alunos mostraram que haviam significativamente entendido o porquê de ser impossível abrir a caixa. Depois de toda a discussão acerca da natureza da luz, as interpretações da Mecânica Quântica e a questão ontológica subjacente a essas interpretações, um dos alunos chegou até a professora e fez o seguinte comentário:

A - Esse negócio aí da luz... é como no caso da caixinha né? Cada hora sai um desenho melhor, mas saber o que tem dentro mesmo não tem jeito.

Porém, é preciso que indiquemos as potencialidades e cuidados em se trabalhar com este marcador. Sua inserção implica a obrigação de se dominar as inúmeras possibilidades que podem surgir dos alunos, revelando a necessidade de um razoável entendimento sobre o processo de construção da ciência por parte do professor. De forma a ilustrarmos nossa afirmação, passamos ao relato de um interessante episódio ocorrido na primeira aula.

Durante a atividade da caixa-preta, um dos alunos desenhou seu sistema interno composto por dois gnomos que se incumbiam de movimentar os palitos. Temeroso com o que havia feito, ele resolveu apenas mostrar à professora o desenho (reproduzido abaixo), sem colocá-lo na folha própria da atividade. Sua justificativa para a professora foi exatamente esta: “*Você não falou que eu posso pôr o que eu quiser? Eu que acho o que existe aí dentro? Então...*”



Obviamente, o aluno não acreditava na existência de gnomos no interior da caixa, porém este episódio demonstra os perigos e as inúmeras possibilidades que podem surgir ao se trabalhar com esse tipo de operacionalidade. Para um professor atento, preparado para tecer discussões epistemológicas, tem-se aqui uma chance de

se discutir com todos seus alunos sobre aquilo que distingue as ciências de qualquer outro corpo de conhecimento, como a magia, a própria filosofia ou a religião.

Assim, de acordo com nossa análise, concluímos que o primeiro marcador é capaz de propiciar a construção de exercícios avaliáveis. Mesmo quando os modelos construídos pelos alunos não forem adequados (como, por exemplo, o dos gnomos) o professor ainda pode ser capaz de avaliá-los, discutindo os motivos que guiam a plausibilidade e construção de modelos na ciência. Assim, há uma gama de atividades que podem fomentar discussões a partir do erro do aluno, que passa a ser construtivo. Por que a física não pode aceitar os gnomos? Acreditamos que o aluno ao compreender a resposta a essa pergunta, terá muito mais chances de entender os processos que guiam o conhecimento científico, de forma que estará mais apto a obter uma compreensão mais profunda da ciência e de seus processos.

Entretanto, percebemos que para o aluno, este saber não parece ser avaliável (*Professora eu posso pôr aqui o que eu acho? Se nem você sabe como é a caixa preta como eu vou saber isso?*). Desta forma, não sendo trabalhado de maneira cautelosa esse saber pode conduzir à falsa impressão de que tudo é permitido, de maneira que pode ser possível caber um gnomo dentro da caixa....

Assim, esta análise traz uma série de reflexões e, ao que tudo indica, encontramos indícios de que este marcador parece requerer outra forma de operacionalidade e avaliação, diferentes daquelas tradicionalmente efetuada no ensino de Física Clássica.

MARCADOR II – ESPECTROSCOPIA

O principal intuito da inserção deste marcador é apresentar a explicação semi-clássica para os espectros observados pelos alunos. O objetivo é relacionar a frequência de oscilação dos elétrons constituintes dos diferentes elementos químicos à cor da luz por eles emitida. Surge, neste momento, a oportunidade de se inserir o problema do “colapso do átomo” devido à previsão clássica da emissão contínua de energia por uma carga acelerada, possibilitando assim confrontar os limites desta teoria. Aliado a isso, discute-se, a partir da observação do espectro descontínuo, a necessidade de revisão dos modelos atômicos. Assim, é possível inserir o modelo atômico de Bohr como uma explicação para esta descontinuidade espectral, e também coloca-se pela primeira vez a idéia de quantização da energia como uma resposta à incapacidade de explicação da existência da matéria pela teoria clássica.

II.1 Descrição das atividades:

A – Construção do espectroscópio e a análise dos espectros das lâmpadas

Os alunos construíram um espectroscópio “caseiro” com o uso de pequenas caixas de papel, ou canos de PVC, e a utilização de redes de difração feitas a partir de pedaços de CD (p.32 do anexo)³⁶. Após a confecção, os alunos, cada um munido de seu espectroscópio, prospectaram as diferentes fontes de iluminação presentes nos arredores de suas casas ou no caminho para a escola. Os estudantes relataram quais espectros observaram e buscaram semelhanças e diferenças encontradas, preenchendo um pequeno roteiro de observação.

Para uma sistematização do tema, após a observação fora da escola, os alunos analisaram o espectro de emissão de seis diferentes lâmpadas (incandescente, fluorescente compacta, luz negra, vapor de mercúrio, mista e dicróica) dispostas em uma “mesa de lâmpadas” presente na sala de aula.

Visando o tratamento aprofundado do conteúdo, para esta atividade contamos também com o uso da Internet. Como a escola possui uma sala de informática, os alunos acessavam o site do Instituto de Física da UFRGS³⁷ onde há

³⁶ Experimento encontrado em Catelli e Pezzini, 2002.

³⁷ <http://astro.if.ufrgs.br/rad/espec/espec.htm>

uma página dedicada à espectroscopia. Com isso, por meio de uma pequena pesquisa, os alunos tomaram conhecimento do desenvolvimento histórico e dos processos técnicos envolvidos neste tipo de análise da luz. A turma foi dividida em duas, de forma que cada uma realizasse uma atividade diferente, havendo uma troca ao término de cada uma delas. Assim, enquanto uma parte dos alunos analisava os espectros das lâmpadas, a outra consultava as informações disponíveis na rede.

B – O Espectro das estrelas: uma “análise” espectral

Para aprofundarmos o estudo dos espectros da radiação, criamos uma metáfora³⁸, materializada em uma segunda atividade, que recebeu o nome de “O Espectro das estrelas”. O intuito era “simular” o trabalho de um astrofísico na identificação dos constituintes estelares. Assim, montamos os espectros de uma série de estrelas fictícias a partir do espectro de vários elementos químicos (p.35-36 do anexo). Os alunos recebiam dois tipos de materiais: transparências impressas com o espectro das estrelas fictícias, produzidas por nós a partir das linhas espectrais e uma folha de papel com a impressão dos espectros dos elementos. Eles, então, deveriam superpor ao papel as transparências de cada uma das estrelas, identificando quais elementos químicos as constituíam. Com esta análise foi possível perceber a idéia dos espectros como “impressões digitais” das estrelas.

II.2 A análise

Inicialmente, é preciso relatar um fato que influenciou sobremaneira na execução deste bloco de atividades. A TV Escola realizou uma matéria sobre o projeto de inserção de Física Moderna no Ensino Médio e a escola na qual realizávamos nossa pesquisa foi filmada. No desejo de não se construir um ambiente totalmente artificial (utilizando criações cenográficas para as salas de aula e atores como alunos) foi solicitado que as gravações fossem feitas na própria escola, com a professora e os alunos participantes do projeto. As tomadas foram realizadas exatamente na aula que iniciáramos a atividade “O Espectro das estrelas”. Assim, neste primeiro momento, os alunos a viram de uma forma fragmentada e extremamente artificial.

Mesmo depois de uma semana, quando da aula seguinte, sua retomada foi prejudicada, pois além de dispersos, alguns alunos consideraram tê-la feita no dia da gravação enquanto outros não conseguiram utilizar os computadores. Estas tensões

38 Achamos melhor a utilização do termo metáfora, pois uma análise espectral de estrelas é extremamente mais complexa que a atividade que criamos.

geraram um clima pouco amistoso, afetando a participação dos alunos. Assim, diferentemente de todas as outras atividades realizadas durante o curso, a grande maioria dos alunos não se viu comprometida com a metáfora do astrofísico. É possível perceber o descontentamento geral (devido às filmagens) expresso pelos alunos, ao término desta aula de retomada, na resposta fornecida a uma pergunta sobre a atividade que menos gostou de realizar, presente no questionário final:

***Q(8)1:** Foi muito difícil, ainda mais que estávamos sem tempo por causa da gravação da TV escola, eu não compreendi muito bem e não consegui terminar os exercícios.*

Mesmo em meio a uma aplicação incomum e conturbada, foi possível encontrar neste marcador características importantes para discutir sua inserção no Ensino Médio. Por ser um saber mais próximo do contexto científico, raramente se faz presente no Saber a Ensinar, como pode ser visto no levantamento dos livros didáticos exposto no capítulo 5. Este fato é determinante para sua não transposição para as aulas mais tradicionais. Assim sendo, a atividade proposta constitui um novo saber no contexto escolar, de forma que sua inserção possibilita uma **modernização dos saberes (Regra I)**.

Também é possível, a partir das atividades, discutir aspectos históricos que possibilitem aos alunos perceberem o desenvolvimento teórico e experimental acerca da análise espectral. Este marcador apresenta uma **atualidade biológica** no sentido que se tem a oportunidade de aproximar a física da sala de aula daquela feita pelo cientista, propiciando uma atualização do conteúdo escolar em relação à sua área de referência. Com isso, pode-se apresentar o trabalho real de um astrofísico, divulgando quais os ramos atuais de pesquisa em espectroscopia e como estes estudos são realizados. Também é possível criar conexões com as implicações tecnológicas dos trabalhos científicos salientando, por exemplo, o motivo da preferência de lâmpadas de sódio na iluminação pública ou as pesquisas realizadas pelos fabricantes de lâmpadas para a otimização de seus produtos.

Assim, além de estar fortemente vinculado com a ciência **consensual** este marcador também permite uma extrema **articulação do saber novo com o antigo (Regra III)**. A partir dele, é possível que as cores e os espectros de emissão e absorção sejam apresentados de forma a conectar dois saberes que aparentemente, no contexto da escola, não possuem qualquer ligação. Também observamos que, durante as aulas, comumente os alunos faziam conexões com a química, revelando

possibilidade de uma ponte com esta disciplina que parece aos alunos pertencer a um universo totalmente distinto daquele explorado pela Física.

Para esta atividade, a realização do curso piloto, realizado em 2003, foi fundamental. Percebemos, naquele momento, a necessidade da confecção de um pequeno roteiro de observação para a utilização do espectroscópio. Notamos que muitos alunos focavam suas observações em aspectos não pertinentes ao estudo dos espectros, como, por exemplo, para que lado formava o “arco-iris”, se ele era torto ou reto etc. Com isso, a continuidade e descontinuidade espectral não era percebida. Assim, no curso aqui analisado, as observações foram guiadas pelo roteiro encontrado no Bloco IV (p.33 do anexo).

Vale ressaltar que esta atividade foi capaz de mobilizar e motivar demasiadamente a grande maioria dos alunos, muito além do esperado. O número de observações por aluno foi enorme, o que os levou a perscrutarem as mais diferentes fontes de luz, indo de faróis de carros a letreiros luminosos. Foi possível testemunhar um momento divertido, no qual um aluno mostrou-se extremamente receoso de entregar seu roteiro à professora. Seu constrangimento advinha do fato de algumas de suas observações serem coletadas a partir do letreiro de uma casa de strip-tease. Este fato indica como os estudantes não ficaram presos em observar fontes luminosas padrões, como postes de iluminação e semáforos.

Outro fator interessante foi a participação familiar. Vários alunos relataram o interesse dos pais, irmãos e namorados(as) em observar as lâmpadas e, pela primeira vez, perceber as “cores escondidas” em suas luzes. Não esperávamos que os estudantes tivessem tamanho comprometimento, nem que a atividade tivesse tanto apelo e exercesse tamanho fascínio, chegando mesmo a nos surpreender. Acreditamos não ser comum que alunos de escolas públicas brasileiras sintam-se espontaneamente interessados em passar horas de uma sexta-feira à noite pelas ruas observando zelosamente lâmpadas para uma atividade escolar de Física. Esse fato pode ser interpretado como um sucesso da atividade, indícios do processo de **terapêutica** existente na Transposição Didática.

Visando alcançarmos sucesso também em termos de formação, trabalhamos na necessidade de se discutir a emissão e absorção de radiação de maneira mais profunda. Para isso elaboramos a atividade “O Espectro das estrelas”, que a partir de nossa análise revelou alguns aspectos relevantes para sua inserção e sobrevivência no âmbito escolar.

Esta atividade configura, genuinamente, um objeto fruto da **criatividade didática**. Obviamente que a análise espectral de estrelas feitas por astrofísicos não

equivale à sobreposição de figuras, como fizemos. Assim, este saber passa a ter uma identidade própria para a sala de aula, não havendo uma equivalência direta da atividade com o saber de referência. Porém, o objetivo maior desta atividade vinculava-se à questão de operacionalidade, visto que assim demos aos alunos a oportunidade de exercitar os conceitos envolvidos na emissão e absorção da luz, bem como obtivemos mais um instrumento para avaliá-los. Com isso, a partir de “O Espectro das estrelas”, foi possível explorar o espectro discreto emitido pelos diferentes gases encontrados pelos alunos ao fazerem suas pesquisas nas ruas e nas lâmpadas dispostas em nossa mesa.

Como análise espectral não figura no Saber a Ensinar, nos raros momentos em que aparece nos livros didáticos, apresenta-se apenas o espectro dos elementos (geralmente somente o do Hidrogênio), omitindo-se a origem dos elementos químicos, podendo conduzir à idéia que estes surgem do nada. Com esta atividade, tem-se uma oportunidade (além de modernizar o saber escolar) de **tornar um conceito mais compreensível (Regra V)**, já que sem fazer uso dos jargões e linguagens próprios dos cientistas, é factível se discutir a formação e constituição das estrelas, revelando a origem dos elementos químicos. Além disso, pode-se mostrar, de forma lúdica, como é possível identificar cada átomo a partir de seu espectro de emissão.

Entretanto, por guardar uma relação de maior proximidade com a atividade científica, é interessante ressaltarmos um aspecto encontrado nas respostas dos alunos ao questionário final (p.69 do anexo). As questões 7 e 8 do questionário referiam-se às atividades que eles mais gostaram e menos gostaram de realizar, respectivamente. Cinco alunos indicaram “O Espectro das estrelas” como a atividade preferencial, enquanto nove deles revelaram ser a atividade que menos gostaram. Durante sua realização notamos que alguns alunos expressavam claramente a falta de sentido em executar algo extremamente distante de seu cotidiano. Assim, quanto à **atualidade moral**, os alunos questionaram a importância da atividade se encontrar no currículo. Uma das respostas do questionário reflete este julgamento dos alunos:

Q(8)2: *Porque era um assunto chato sem muito sentido na vida, simplesmente é uma coisa para aprender e logo esquecer.*

Assim, parece que a ligação feita com o trabalho real de um físico levou-os a descartar a importância da atividade devido à sua “falta de utilidade” para a sociedade. Foi comum percebermos o imediatismo dos alunos, desejosos que qualquer conteúdo exposto tivesse imediatamente sua função social explicitada. A idéia de que um saber

escolar deve ser ensinado a partir do momento que se pode fazer uso dele direto no dia-a-dia esteve presente durante toda a aplicação do curso.

Entretanto, também é possível questionar a forma com que aplicamos a atividade, visto que vários alunos a consideraram complicada. Inicialmente, pensávamos que “O Espectro das estrelas” seria de execução extremamente simplória, o que nos levou, de certa forma, a subestimar sua aplicação. Contrariamente ao que ocorreu, nosso receio era que os estudantes a considerassem muito simples, perdendo o interesse rapidamente. Porém, a simplicidade existente durante nossas especulações não se materializou quando na presença dos alunos, como pode ser visto nas justificativas de alguns deles quando a escolheram como a atividade que menos gostaram:

Q(8)3: *Por que eu achei muito complicado para entender e tive dificuldade nessa atividade.*

Q(8)4: *Porque é chata e complicada.*

Q(8)5: *Ainda temos o fator da complexidade da atividade, mais o problema da tv escola...*

Ainda pudemos observar que uma grande dificuldade encontrada pelos alunos foi a necessidade de checar todas as linhas espectrais dos elementos químicos. Muitos deles acharam que bastava uma linha “bater” para que o elemento fizesse parte da estrela. Com isso, a atividade precisou ser refeita para que eles percebessem a necessidade de que todas as linhas de cada elemento deveriam ter sua correspondente no espectro da estrela para que pudesse ser considerado como seu constituinte. Alguns alunos expressaram sua insatisfação ao responderem à questão 8:

Q(8)6: *Meu espectro não deu muito certo.*

Q(8)7: *Achei ela chata comparada com as outras.*

Também é preciso considerar que, por se tratar de uma atividade capaz de sintetizar e aprofundar o conteúdo apresentado, ela pode perder sua efetividade caso o aluno esteja, no momento de sua realização, sem um domínio mínimo da teoria. Durante a execução foi comum a professora rever os conceitos de emissão e absorção individualmente com os alunos. Aqueles que ainda não haviam estudado de uma forma mais sistemática perceberam neste instante a necessidade da

compreensão do conteúdo para o entendimento da afirmação de que os espectros são como impressões digitais das estrelas. Os comentários constantes dos estudantes, após a aula acerca deste fato podem ser ilustrados pela justificativa de um dos alunos ao escolhê-la como a atividade que menos gostou:

Q(8)8: *Não tinha entendido quase nada desse assunto.*

Notamos assim que alguns alunos sentiram-se desconfortáveis nesse momento por não terem se dedicado suficientemente ao estudo do conteúdo, ficando, então, impossibilitados de compreender a atividade. Contudo, ainda que com os problemas até aqui revelados, 5 alunos a escolheram como a atividade que mais gostaram de realizar. Algumas das justificativas mostraram que com ela foi possível despertar a curiosidade acerca da natureza da luz:

Q(8)9: *Porque é interessante verificar como a luz vem das estrelas, quais os elementos químicos que esta possui, descobrir quantas e quais as cores que as estrelas absorvem e refletem.*

Q(8)10: *Porque mostrou para nós que a luz não é tão simples quanto parece.*

Ainda que tenhamos optado por realizar um tratamento puramente qualitativo dos espectros, este marcador possibilita também a abertura para a criação de exercícios com o tipo de **operacionalidade** tradicionalmente realizada no ensino da Física. Desta forma, a partir das atividades que elaboramos, é possível tratar os espectros de maneira quantitativa, criando, por exemplo, problemas em que o estudante deve encontrar os comprimentos de onda relacionados a cada cor, ou trabalhar numericamente sua ligação com a frequência de oscilação da onda eletromagnética³⁹.

Nossa opção pela não construção de exercícios com este tipo de operacionalidade deu-se justamente pelo grande número de aulas utilizadas com o estudo das cores (que diminuiu consideravelmente o tempo disponível para a inserção dos outros saberes) e a interrupção para gravação da TV Escola. Porém acreditamos ser possível inserirmos este marcador também fazendo uso da operacionalidade presente nos exercícios tradicionais de Física Clássica, já que o tratamento

³⁹ Um desdobramento possível para esta atividade é a construção de estrelas, por exemplo, sem hidrogênio mas com elementos mais pesados em sua constituição. Tais estrelas podem ser utilizadas para avaliar a compreensão dos alunos quanto ao processo de formação das estrelas e dos próprios elementos químicos.

matemático necessário neste momento é muito próximo daquele dominado pelos alunos do Ensino Médio.

Ainda em relação à operacionalidade, nossa análise mostrou que este marcador é passível de ser avaliado de maneira objetiva, mesmo que prescindida da matemática. Como nos revela a Transposição Didática, a avaliação desempenha um papel determinante na inserção e manutenção de um novo saber no contexto escolar. Sendo assim, vimos que é possível a confecção de questões capazes de avaliar os estudantes objetivamente, como as que mostramos abaixo, juntamente com algumas respostas dos alunos⁴⁰.

1 - Quando uma substância está emitindo luz, o que deve estar acontecendo com os elétrons de seus átomos?

E₂(1)1: devem estar em movimento de freqüências correspondente a luz que emitir.

E₂(1)2: os elétrons devem estar em movimento oscilatório contínuo.

E₂(1)3: eles estão em rotação contínua ou seja girando em volta do núcleo, oscilando para transmitir sua freqüência de onda. Cada lâmpada tem sua freqüência. Se o elétron cai no núcleo acaba a eletricidade.

2 - O que significa dizer que o espectro do mercúrio apresenta apenas 5 cores?

E₂(2)1: Significa que os elétrons tem frequencias de 5 cores, ou seja, os elétrons só oscilam na frequencia das cores que emite, no caso, 5.

E₂(2)2: que emite 5 frequencias diferentes formando a luz do mercúrio

E₂(2)4: significa que ele possui 5 freqüências diferentes que, quando juntas, formam o espectro de mercúrio. O que diferencia uma cor da outra é a freqüência de sua onda eletromagnética.

E₂(2)5: todo eletrom possui uma freqüência diferente, então, se ele tem cinco cores, ele tem cinco freqüência.

E₂(2)6: cada cor corresponde a uma onda eletromagnética com sua freqüência característica. O que diferencia uma cor da outra é justamente a freqüência de sua onda eletromagnética.

⁴⁰ Os exercícios referentes a este conteúdo podem ser encontrados na página 67 do anexo.

3 - O que significa dizer que o espectro de uma substância é contínuo?

E₂(3)7: a substância tem uma frequência ligada uma a outra. E isso faz com que as cores não se separem.

E₂(3)8: que seus elétrons estão em movimento e emitindo muitas frequências diferentes.

E₂(3)9: é porque ele só tem uma frequência.

E₂(3)10: significa que as cores não se separam.

E₂(3)11: significa que o movimento (frequência) de oscilação dos átomos é contínua.

E₂(3)12: Porque há um movimento repetitivo que não para.

E₂(3)13: significa que as cores aparecem uma unida a outra, sem um espaço entre elas.

Ressaltamos novamente que as correções efetuadas pela professora consistia em discutir com os alunos sobre suas respostas para que os erros conceituais ficassem mais claros. A necessidade desta revisão das respostas vem da percepção que a professora possui sobre as dificuldades que seus alunos têm em escrever. Ao longo das aulas foi possível perceber que muitos estudantes compreendem bem os conceitos e elaboram boas explicações verbais, mas apresentam profundas dificuldades em transpô-las para o papel, criando textos confusos ou fragmentados. Ainda que demandem mais tempo e trabalho para o professor acreditamos que com este tipo de operacionalidade é possível a obtenção de avaliações objetivas para este marcador.

Como o objetivo principal era a apresentação da natureza da luz, o problema dos espectros descontínuos e a explicação inicial da luz como onda eletromagnética (para que fosse possível chegar à discussão acerca dos modelos atômicos e a quantização) vimos que este marcador é capaz de **tornar um conceito mais compreensível (Regra V)**. Fizemos uma prova⁴¹ cerca de um mês após as discussões e obtivemos respostas que indicam essa capacidade, como podem ser vistas abaixo:

⁴¹ Esta prova encontra-se na página 65 do anexo

1 – Diga o que é a luz e como ela é produzida.

P₂(1)1: a luz é uma frequência de ondas eletromagnéticas. Os elétrons recebem a descarga de energia específica para dar início a sua oscilação; oscilam ao redor do núcleo de acordo com sua frequência, emitindo a luz.

P₂(1)2: luz é o movimento de “vai-e-vem” que o elétron faz, chamado de frequência, são ondas eletromagnéticas.

P₂(1)3: a luz é uma frequência de elétrons, cada tipo de luz tem uma frequência diferente fazendo com que cada luz tenha uma cor diferente. É produzido pelo constante movimento oscilatório dos elétrons.

P₂(1)4: Luz é uma onda eletromagnética. Produzida através da frequência de oscilação dos elétrons dos átomos

2 – Explique por que cada elemento químico possui um padrão característico de linhas espectrais, ou seja, o espectro é como a impressão digital do elemento.

P₂(2)2: Em cada elemento diferente, os elétrons se movimentam em frequências diferentes, cada elemento absorve e emite cores diferentes.

P₂(2)3: por que cada elemento químico possui sua frequência diferenciando um elemento químico do outro, os espectros são como uma leitura de frequências desse elemento químico.

P₂(2)5: porque todos os elementos químicos possuem frequências diferentes (emitem cores diferentes de acordo com o movimento de seus elétrons), ou seja, cada elemento tem sua impressão digital diferente assim como nós.

P₂(2)6: porque para cada elemento, os elétrons de seus átomos possuem uma frequência de oscilação diferente, dando-lhes assim, diferentes características.

3 – Como deveria ser o espectro de emissão da luz vinda de uma lâmpada de mercúrio de acordo com o modelo atômico clássico (anterior ao modelo de Bohr)? Justifique sua resposta.

P₂(3)6: Ele deveria ser contínuo (na realidade é separado) pois os elétrons girariam em todas as direções e em todas as órbitas.

P₂(3)7: Todos espectros teriam as cores do arco íris inteiro, e o modelo clássico poderia ter elétrons em tudo não havendo uma variação, fazendo assim um arco íris por inteiro.

P₂(3)8: Deveria ser contínuo pois os átomos giram em todas as direções e órbitas.

Porém, é imperioso deixar claro que a utilização do modelo semi-clássico para a explicação dos espectros surge apenas como uma ferramenta didática. Cremos que o problema do colapso do átomo, previsto pela teoria clássica, constitui-se um problema apenas para os físicos, no sentido de que é incapaz de gerar nos alunos a mesma perplexidade causada para os cientistas. Sendo assim, optamos por apresentar a explicação clássica para propiciar aos alunos a percepção do problema existente no modelo, na tentativa de sensibilizá-los para que, desta forma, fossem capazes de compreender a ruptura que se iniciava na Física.

Assim, o modelo clássico tem seu uso tratado com uma ponte entre o novo e velho (**Regra III**) na intenção de tornar o conceito mais compreensível (**Regra V**). Com isso, a atividade foi útil para explorar as observações que os estudantes fizeram, gerando explicações, mas também serviu para que, posteriormente, fosse revelado o caráter transitório deste modelo. Surge assim um pretexto para a utilização do modelo de Bohr, que aparece contextualizado, solucionando um problema agora percebido pelos alunos. Acreditamos que desta forma é possível a utilização do modelo atômico de Bohr como um instrumento didático, que estando conectado com a espectroscopia, pode ser apresentado de forma não dogmática.

MARCADOR III – O ÁTOMO DE BOHR

Ao término do bloco de atividades do marcador II, o Átomo de Bohr foi introduzido como um modelo explicatório e preditivo para as diferenças encontradas pelos alunos nos espectros (contínuos e discretos). A partir deste modelo, começou-se a discussão sobre a quantização da energia e, além da análise espectral, foi possível fazer com que os alunos re-interpretassem todo o processo da percepção de cores que estudaram até então utilizando este modelo de absorção e emissão de luz.

Muito tem sido dito, contra e a favor, sobre a utilização do modelo atômico de Bohr e de outros modelos clássicos para a inserção da FMC nas salas de aula, como exposto no capítulo anterior. Em meio às dúvidas geradas pelos resultados das pesquisas consultadas, optamos ainda assim em fazer uso do modelo de Bohr devido ao seu encadeamento com a análise dos espectros, a apresentação da ruptura com a Física Clássica, bem como a ligação com a inserção do efeito fotoelétrico, construindo um caminho coerente e inteligível para a introdução da dualidade onda-partícula. Como veremos na análise a seguir, a nova estrutura do saber transposto parece exigir sua utilização.

Outro aspecto importante, e que necessita reflexão, diz respeito ao uso de analogias e metáforas no ensino dos conceitos de Física Moderna. Há uma intensa linha de pesquisa sobre os problemas acerca desta utilização no ensino da Física (DAGHER, 1995a, 1995b e 2000; DUIT, 1991; LAWSON, 1993; NEWTON, 2000; SUTTON, 1996; THAGARD, 1992, TREAGUST et alii, 1992) sem, contudo, um consenso sobre sua efetividade, havendo grandes divergências de opiniões e resultados. Geralmente, as analogias são utilizadas como suporte para a introdução de conceitos complexos ligados a modelos atuais. Mas também podem vir conectadas a modelos ultrapassados, com o intuito de facilitar sua aprendizagem. Assim, além de utilizarmos um modelo semi-clássico, fizemos uso de analogias para a inserção e discussão da quantização de energia.

A idéia principal surge da possibilidade de escaparmos da seqüência com que o ensino de física é tradicionalmente exposto. Pode-se, desta forma, desviar-se da hierarquia educacional, tentando tomar um caminho alternativo, evitando a idéia do conflito cognitivo. Desde o final dos anos 70, o Construtivismo vem tomando corpo na educação científica. Suas novas posições epistemológicas trabalham o conhecimento como uma construção humana, rejeitando a idéia de que a ciência progride de forma linear, por acumulação. O Construtivismo se interessa pelo processo pelo qual se adquire o conhecimento, tornando essencial o papel daquele que aprende, aquele que

constrói continuamente significados e que encontra sentido ao estabelecer novas relações. Sendo assim, são extremamente relevantes as idéias que os alunos constroem para dar sentido aos assuntos estudados na escola e suas relações com os fenômenos do dia-a-dia.

Dentro de uma abordagem construtivista, a mudança conceitual é tida como uma interação entre as concepções prévias dos estudantes e as novas experiências, transformando a aprendizagem em um processo dinâmico, constante, de construção de conhecimentos. Desta forma, as estratégias propostas pelo construtivismo são, em sua maioria, baseadas na idéia do conflito cognitivo.

O conflito cognitivo passa a ser a condição na qual as concepções prévias podem vir a se tornar conceitos científicos. Criam-se situações de conflito cognitivo em que a superação deste conflito possa acontecer por meio do abandono das idéias prévias, sendo modificadas pelas idéias científicas, que possuem um maior poder explicativo. Porém, raras são as pesquisas sobre conhecimento prévio dos alunos acerca de temas de FMC. Além disso, questionamos a própria possibilidade de existência de tais conhecimentos, já que as concepções prévias são forjadas na experiência diária e, desta forma, torna-se impossível que tais conhecimentos prévios em Física Quântica, por exemplo, sejam então construídos.

Assim, o conflito cognitivo faz uso da negação para que através dela se possa colocar em xeque o conhecimento prévio do aluno e, com isso, fazer surgir possibilidades para a construção do novo conhecimento, baseado principalmente na idéia da equilibração piagetiana (INHELDER *et alii*, 1978).

As analogias fazem apelo ao que nos é conhecido, familiar, revelando uma tendência comum da forma de pensar do ser humano. O conhecimento vem por meio da afirmação, fazendo um apelo maior à simpatia e não à antipatia. Desta forma, através de conhecimentos existentes, familiares, o aluno pode agregar outros saberes, de outras áreas do conhecimento, sendo extremamente útil para o pensamento criativo e para a explicação de vários fenômenos, propiciando assim as condições necessárias para a implementação da nova estrutura conceitual.

Holyoak e Thagard (1995) revelam o importante papel das analogias nas ciências mostrando que elas sempre estiveram presentes no processo da construção da Física, desde as analogias entre ondas na água e o som, feita pelos gregos, até chegar ao próprio Bohr, que utilizou o símbolo do Yin e Yang para explicar a complementaridade, passando pela analogia mais conhecida por todos: o átomo como um sistema solar.

Estes autores ressaltam que em muitas ocasiões a fonte, o familiar, não existe, porém, ele pode ser construído. Talvez o exemplo mais ilustre seja o de Maxwell, que

não possuía um modelo conhecido para a compreensão do eletromagnetismo, o que o levou à construção de um novo modelo onde suas equações seriam capazes de serem aplicadas. Isto nos encoraja, no sentido de que a Física Moderna exige justamente a criação destes novos modelos, de novas representações, no desejo de que o não familiar de hoje se torne o familiar de amanhã.

Assim, a construção de analogias com objetivos de ensino pode se transformar numa alternativa eficiente para lidar com os conteúdos de Física Moderna e Contemporânea. Desta forma, propõe-se utilizar as analogias como uma ferramenta para a mudança conceitual e, ainda mais, mostrar para os alunos a força reducionista destas analogias, revelando seus limites e os erros conceituais que elas podem induzir, evidenciando a cautela necessária em sua utilização.

Mesmo que não haja pesquisas no ensino da Física Quântica que possibilitem relacionar erros conceituais com o uso de analogias e modelos clássicos (STEFANEL, 1998), alguns pesquisadores sugerem fortemente a sua não utilização. Como exposto no capítulo 5, Fischler e Lichtfeldt propõem o ensino da Mecânica Quântica, em nível médio, excluindo totalmente o modelo de Bohr, considerando que seu uso torna-se um obstáculo para a aprendizagem dos conceitos atômicos modernos.

Para que possamos refletir acerca de suas considerações ressaltamos algumas frases presentes no artigo por eles escrito em 1992. Neste trabalho eles afirmam que:

Na física, este modelo [de Bohr] foi substituído há 65 anos pela mecânica quântica na qual a descrição do átomo **dispensa todas as visualizações**. (FISCHLER e LICHTFELDT, 1992, p.181, grifo nosso).

Esta afirmação é correta, pois o formalismo matemático da Mecânica Quântica é o que define sua descrição. Com isso, sua descrição conceitual e seus fundamentos passam a ser secundários. Isso se revela na plena concordância dos cientistas com este formalismo, entretanto, há entre eles, sérias e profundas discordâncias acerca das interpretações da Mecânica Quântica, divergências existentes mesmo entre alguns de seus principais artífices. Pode com isso parecer que a Mecânica Quântica se resume à matemática, visão que é indiretamente passada aos alunos de graduação em Física na maioria das Universidades. Basta notar que quase nunca há espaço para as discussões filosóficas e epistemológicas sobre esta teoria nos cursos universitários, priorizando-se fortemente a utilização do instrumental matemático, muitas vezes efetuado de forma mecânica e sem significado.

Certamente que a matemática possui um valor inestimável no sentido de que é impossível usar somente o entendimento adquirido na interação com o mundo macroscópico para compreender os conceitos da Física Quântica. Assim, a afirmação de que a “descrição do átomo **dispensa todas as visualizações**” (FISCHLER e LICHTFELDT, 1992) é plenamente compreensível no âmbito do Saber Sábio, já que um físico não necessita criar nenhuma representação além daquela fornecida pela estrutura matemática que suporta sua teoria. Contudo, cabem os seguintes questionamentos: nos domínios do Saber a Ensinar e do Saber Ensinado, vale esta mesma afirmação? Será que os alunos do Ensino Médio não necessitam de nenhuma forma de “visualização” para compreender a estrutura atômica? Além disso, é possível fazer com que a Mecânica Quântica tenha sentido sem o uso de todo este formalismo matemático?

Nosso trabalho não tem a pretensão de responder definitivamente estas questões, porém é preciso que, como pesquisadores em ensino de Física preocupados com a inserção efetiva da FMC no Ensino Médio, delineemos algumas respostas.

Inicialmente, não achamos possível que haja uma dispensa a qualquer tipo de “visualização” na inserção dos conteúdos físicos no Ensino Médio. Isso se baseia justamente no fato de esta dispensa ocorrer somente por meio do domínio de todo um instrumental matemático sofisticado que faz com que uma série de equações se torne mais “visível” que qualquer outra forma usual de visualização. Porém, sabemos que o manuseio desta ferramenta matemática inexistente nos alunos das salas de aula brasileiras. Em nossa opinião, a incapacidade de dar significado às equações que definem os modelos atômicos quânticos se traduz na impossibilidade de iniciar um curso introdutório de Física Quântica no Ensino Médio (que não seja meramente informativo) a partir de algum modelo mais sofisticado que o de Bohr, dispensando qualquer tipo de visualização.

O fato dos estudantes possuírem um precário domínio teórico deve ser considerado nas pesquisas e, principalmente, nas propostas de inserção de temas modernos no Ensino Médio, já que este *background* é necessário para realmente se ir além dos modelos semi-clássicos.

Assim, parece-nos inadequado que se faça a inserção da Física Quântica sem essa etapa intermediária, entre um modelo mais simples e outro mais sofisticado. Desta maneira, esta forma de “visualização” fornecida pelo modelo atômico de Bohr é mais adequada à realidade do aluno brasileiro, tornando a inserção introdutória de conceitos de Física Quântica possível. Com isso, pode-se encarar o problema da inserção das teorias modernas no Ensino Médio de maneira efetiva e plausível, e não

apenas da forma prescritiva apresentada na grande maioria das pesquisas nacionais em ensino que simplesmente desconsideram esta realidade e passam a indicar caminhos inviáveis de serem trabalhados em situações reais de sala de aula, conduzindo assim a quase 20 anos de pesquisas incipientes nesta área.

É preciso deixar claro que nossa principal crítica é dirigida às pesquisas que fazem referência à inserção destes temas no Ensino Médio. Certamente que nos cursos de graduação é preciso, e urgente, que se vá além da velha física quântica. Não só pela necessidade de se aprofundar no estudo e compreensão da teoria quântica, mas também no intuito de poder, assim, criar condições para que as transposições de seus elementos para a sala de aula possam ser efetuadas. Curiosamente, enquanto a comunidade de pesquisa em ensino de física pressiona a inserção da FMC na escola média, vemos que a maioria dos alunos graduados só tem contato mais profundo com a mecânica quântica em cursos de pós-graduação, e, pior, geralmente nas áreas de física “dura”, fugindo da grade curricular dos cursos de pós-graduação em Ensino. Parafraseando Gaston Bachelard, é surpreendente que os pesquisadores em ensino de física ainda fiquem surpresos com a ausência destes conteúdos nas salas de aula...

Quanto à possibilidade de compreensão da Mecânica Quântica, é certo que a matemática desempenha um papel fundamental em toda e qualquer teoria física, principalmente no sentido de exterminar com as ambigüidades que podem surgir, por exemplo, com o uso das palavras que, fora do contexto específico da ciência, possuem outros significados. A matemática é, então, a forma mais completa, acurada e precisa de descrever um fenômeno, sendo assim inerente a qualquer parte da física. Contudo, uma teoria não se resume à matemática. Dizer que a Teoria Quântica é “só matemática” é tão verdade quanto dizer que um poema se resume às palavras...

Porém, devido à necessidade de estruturação matemática da teoria Quântica, parece que a única opção viável para o Ensino Médio é a inserção deste tema a partir do seu estudo qualitativo e conceitual. Entretanto, a principal dificuldade de inserção dos modelos atômicos quânticos (Schrödinger e Heisenberg) vem justamente da introdução qualitativa de conceitos criados no bojo de um formalismo matemático extremamente avançado. Por exemplo, uma mudança fundamental surgida com o desenvolvimento elaborado por Schrödinger deu-se com a possibilidade de calcular as probabilidades das transições eletrônicas, algo impossível de ser realizado pela velha mecânica quântica e o modelo atômico de Bohr.

O tratamento probabilístico é também utilizado quando se deseja determinar a posição de um elétron no espaço. Assim, a probabilidade $P(x)$ de se encontrar um

elétron em um intervalo entre x e $x + dx$ é definida por:

$$P(x)dx = |\Psi|^2 dx.$$

A interpretação probabilística da função de onda Ψ foi proposta por Max Born⁴². Assim, a probabilidade de se encontrar um elétron num determinado intervalo dx , de acordo com Born, é dada por:

$P(x,t)dx = \Psi^*(x,t)\Psi(x,t)dx = |\Psi(x,t)|^2 dx$, onde Ψ^* é o complexo conjugado de Ψ .

Para se determinar a probabilidade de se encontrar um elétron em qualquer intervalo (x e $x + dx$) é necessário que se faça a soma individual de cada intervalo. Como um elétron pode ocupar qualquer ponto do espaço, é preciso que esta soma seja efetuada para todos os valores possíveis de x . Logo:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^* \Psi dx = 1.$$

Esta é a condição de normalização, que desempenha um papel imprescindível na Mecânica Quântica, já que impõe restrições adicionais às possíveis soluções da equação de Schrödinger. E é justamente esta condição de normalização que conduz à quantização de energia.

Este pequeno exemplo indica a dificuldade em transpor para o Ensino Médio um aspecto fundamental da Física Quântica, a quantização da energia, optando por fazê-lo utilizando um modelo mais correto que o de Bohr. Talvez, neste caso, a quantização de energia possa até ser inserida, mas somente por decreto, pois ela fica clara somente por meio de uma análise matemática inacessível aos estudantes da educação básica.

Ainda que não haja possibilidades de se desconsiderar esse grave problema, defendemos que é possível a compreensão conceitual de alguns elementos da Física Quântica mesmo não fazendo uso de matemática avançada. Por exemplo, certamente não achamos exequível trabalhar a função de onda ou a equação de Schrödinger no Ensino Médio, entretanto foi possível discutir de forma inteligível o colapso da função de onda em uma das interpretações apresentadas com o interferômetro de Mach-Zehnder, como veremos nas seções seguintes.

Assim, a Transposição Didática esclarece que ao transpor estes saberes do ambiente científico para as salas de aula é necessário criar uma nova estrutura, mas é preciso que ela seja vista sem preconceitos, sem ser considerada como uma

⁴² Ainda que esta seja a interpretação mais aceita da Ψ , esta proposição foi duramente criticada por Einstein e o próprio Schrödinger, pioneiros e fundadores da Mecânica Quântica (JAMMER, 1974).

degradação do saber ou um ensino de “baixo nível”. Estas transformações precisam ser reconhecidas como exigências do contexto escolar, e que, sem elas, não é possível uma inserção significativa de qualquer conceito moderno, havendo espaço somente para a introdução puramente informativa e sem significação, incapaz de fazer com que os alunos compreendam a nova maneira de olhar o mundo criado pela Física do século XX.

Ainda em relação ao trabalho dos pesquisadores alemães, outro aspecto chamou-nos a atenção. Mesmo que situados em uma realidade bem diferente da brasileira, que os possibilita ir além do modelo de Bohr, uma de suas afirmações nos revela um motivo pelo qual parecem não perceber a necessidade de transformação dos saberes:

Na física quântica, mais que em outros tópicos, problemas de **redução de conceitos difíceis em termos mais simples** são centrais para o ensino. (FISCHLER e LICHTFELDT, 1992, p.181 grifo nosso).

Certamente é possível que estes pesquisadores desconsiderem, ou talvez desconheçam, os processos de transformação necessários a qualquer saber científico para que este figure no ambiente escolar, visto que afirmam que a simplificação é uma questão central para o ensino. Desta forma compreendemos sua defesa de exclusão do modelo de Bohr, já que concebem o ensino como uma mera simplificação de conceitos difíceis. Essa visão, no mínimo distorcida do processo de transposição didática, revela-se implicitamente na maioria das pesquisas que criticam o uso de modelos semi-clássicos.

Porém, a Transposição Didática possibilita conceber que as transformações ocorridas com os elementos da Física Quântica são feitas no sentido de se adequarem ao nível cognitivo e de entendimento dos alunos do Ensino Médio, além de considerar características pertinentes ao próprio saber e do contexto escolar. Deste modo, a relação que une o Saber, o Professor e o Aluno durante a dinâmica da transposição não pode ser considerada como um processo de simplificação. Logo, o uso dos modelos semi-clássicos nesta etapa da aprendizagem pode ser defendido, pois podem configurar como objetos de uma **criatividade didática, torna um conceito mais compreensível (Regra V), transforma um saber em exercícios e problemas (Regra IV) e articula o saber novo com o antigo (Regra III)**.

Um argumento recorrente nos trabalhos que criticam a utilização dos modelos clássicos pode ser sintetizada na afirmação abaixo. Segundo Fischler e Lichtfeldt:

[...] o ensino enfatiza demasiadamente as concepções da física clássica. O uso de modelos mecânicos, que é implícito nisto, constitui-se em um obstáculo adicional para um entendimento apropriado da física quântica. (FISCHLER e LICHTFELDT, 1992, p.181).

Tal argumento fomenta uma interessante discussão: se o uso de concepções clássicas é tão nocivo à aprendizagem de Física Moderna, como podem ser criados, há tantas gerações, físicos altamente qualificados, que desenvolvem cada dia mais estes conceitos, já que foram ensinados assim? Como nós, pesquisadores brasileiros, podemos então compreender a Física Quântica se nosso ensino foi todo baseado em modelos clássicos, que ainda hoje é a forma de ensino presente na maioria de nossas universidades? Ao refletir sobre estas perguntas nos parece que o uso de modelos semi-clássicos é um obstáculo possível de ser transposto para quem continua na carreira científica, já que

[...] o uso de modelos e aproximações clássicas ou semi-clássicas (pré-quanticas) é algo freqüente na prática corrente da Física, e os cientistas não se privam de fazê-los sempre que têm oportunidade. (SOLBES *et al*, 1987, p.194).

Certamente que a utilização de modelos e analogias clássicas e semi-clássicas para o ensino de FMC deixa lacunas e induz concepções limitadas, mas parece que até mesmo a ausência destes tópicos em nosso Ensino Médio é, então, remediada quando o aluno opta por seguir uma carreira acadêmica em Física. Arons considera que

Para estudantes que continuam em física, as lacunas teriam que ser reconhecidas, aceitas e lembradas na universidade, e preenchidas em cursos subseqüentes. (Se os estudantes realmente tiverem uma chance de aprender, entender, e absorver os conceitos mais básicos, eles subseqüentemente preencheriam pelo menos algumas destas lacunas por eles mesmos). (ARONS, 1990, p. 265)

Certamente tais modelos semi-clássicos precisam ser substituídos na estrutura cognitiva de quem continua na pesquisa em física, e parece que isso é o que ocorre já que as pesquisas se desenvolvem a cada ano. Porém, deve-se ressaltar que a re-estruturação de conceitos não se resume aos temas de FMC. A própria Física Clássica é repleta de exemplos da necessidade de substituição de conceitos a partir do estudo e contato sistemático com a Física, de maneira que *“A intuição” mecanoclássica correta só é obtida em geral depois de o aluno cursar várias*

disciplinas e de bastante reflexão”. (GRECA e HERSCOVITZ, 2001, p.84). Assim, aqueles que optam por seguir no estudo e compreensão da Física parecem ser capazes de transpor os obstáculos que surgem da necessidade de explorar o mundo por meio dos instrumentos criados pela ciência, abandonando assim a intuição criada somente pela interação sensorial.

Mas e o cidadão comum, sem o conhecimento especializado? É notoriamente sabido que a imensa maioria dos alunos do Ensino Médio opta por carreiras não científicas, surgindo assim o questionamento se esses alunos precisam ser expostos a um nível de aprofundamento teórico tão extenso. Com relação aos modelos atômicos, é realmente necessário que se vá muito além do modelo de Bohr? É preciso exigir que na escola média o ensino dos modelos atômicos se estenda a níveis de compreensão tão profundos?

Acreditamos que, com tamanha exigência, ao invés de obterem uma visão mais precisa da quântica estes alunos podem ficar sem visão alguma. Considerando o caráter terminal do Ensino Médio, a imensa maioria de estudantes que não ingressarão em carreiras científicas e aqueles que não seguirão na vida acadêmica, podem assim acabar perdendo a única chance de vislumbrarem o mundo novo apresentado pela Quântica. Não seria melhor possuírem somente uma visão adequada a este momento, ainda que sem a precisão e profundidade desejada?

Obviamente, que esta forma de inserção deixa de ser completa, no sentido que não transpõe os modelos recentes criados pela Física. Porém, corre-se o risco de deixar de apresentar um modelo útil para motivar o gosto por conhecer um pouco dos processos e produtos da Física. É preciso mais que isso?

Assim, em nossa opinião, limitar a descrição da estrutura atômica ao modelo de Bohr nos níveis elementares de ensino é algo perfeitamente válido, sempre que se insista simultaneamente nas próprias inconsistências do modelo, algo que muito poucas vezes se faz. (SOLBES *et alii*, 1987, p.194).

III.1 Descrição da atividade:

Para este marcador, as atividades foram basicamente resoluções de problemas numéricos, com cálculos de transições eletrônicas e níveis de energia, e a retomada da emissão de radiação, em especial na faixa do visível, porém agora com a elaboração das respostas utilizando o modelo atômico de Bohr. Também, a partir da idéia de modelo como um análogo estrutural da realidade, discutiu-se sua

transitoriedade, revelando explicitamente suas possibilidades e limites. (Bloco V, p.39-45 do anexo).

III.2 A análise

Sem resultados de pesquisas que possibilitem levar a comunidade de ensino de física a um consenso, parece que as propostas de utilização baseiam-se em convicções e gostos pessoais. Assim sendo, acreditamos que com o uso da Teoria da Transposição Didática foi possível estabelecer critérios que possibilitam uma escolha menos subjetiva para a utilização, ou não, deste modelo no Ensino Médio. Com isso, vamos analisar os fatores que nos indicam a legitimidade em tal uso, ressaltando as principais características de sua transposição e sua possível capacidade de sobrevivência no contexto escolar.

Como exposto anteriormente, durante a atividade da observação da mesa de lâmpadas, os alunos ficaram intrigados com a diferença encontrada nos espectros, mostrando-se curiosos acerca do “desaparecimento” de algumas cores quando olhavam determinadas lâmpadas pelo espectroscópio. Foi muito comum que eles, logo ao observarem os espectros discretos, perguntassem por que isso estava acontecendo. Para a explicação deste fenômeno introduzimos o modelo atômico de Bohr.

Esta introdução foi feita a partir de uma aula expositiva, utilizando uma apresentação em Power Point (p.45 do anexo) onde foi possível discutir o problema do colapso do átomo, surgido com a explicação clássica da emissão de ondas eletromagnéticas, e a saída encontrada por Bohr para a solução deste problema. Com isso, em sintonia com a seqüência elaborada, já que desde o início do curso focamos na utilização dos modelos na ciência, achamos pertinente mostrar a evolução dos modelos atômicos, apresentando o modelo de Bohr como uma solução transitória, revelando seus limites e discutindo o que mudou e o que, principalmente, permaneceu com os aperfeiçoamentos e transformações sofridas por este modelo.

Cabe ressaltar que a impossibilidade de construção de atividades investigativas para a discussão deste tema sugere a dificuldade em estabelecer outra forma de inserção sem o uso das aulas expositivas como um recurso didático. Talvez esta característica deste saber possa, de alguma forma, amenizar o processo de degradação sofrido pelas aulas expositivas que, nas últimas décadas, tornaram-se uma das maiores vilãs do ensino. Desta forma pode ser possível resgatar sua importância, revelando seus pontos positivos, como, por exemplo, seu poder de síntese. Assim, desde que durante boa parte do curso sejam fomentadas discussões e

que se permita sempre a abertura de espaço para as colocações dos alunos, parecidos com os problemas relacionados a essa modalidade didática (como, por exemplo, a passividade dos alunos) podem ser minimizados.

Para estabelecer uma sequência de ensino coerente e acessível ao domínio intelectual dos alunos, optamos por fazer esta inserção revelando as incoerências que surgem com as explicações dos espectros a partir do eletromagnetismo de Maxwell. Discutimos as previsões fornecidas pela Física Clássica quanto à emissão da radiação eletromagnética e inserimos a solução proposta na teoria atômica de Bohr.

O objetivo era apresentar, de maneira cuidadosa, estas duas teorias para fazer com que os alunos reconhecessem o choque que foram as proposições de Bohr para a física da época, devido à incapacidade das teorias clássicas em explicar os espectros discretos, deixando claro o caráter revolucionário de seus trabalhos. Notamos que desta forma é possível fazer com que os estudantes conheçam um problema que existiu somente no domínio da Física, visto que esta discussão não se situou em um contexto não científico, fugindo ao conhecimento comum.

Neste sentido, pôde-se realizar uma **modernização do saber escolar (Regra I)**, pois se aproximou a escola das discussões epistemológicas raramente tratadas em outro ambiente que não a sala de aula, visto que este foi um dilema enfrentado pela Física que, mesmo vindo a transformá-la profundamente, não faz parte do escopo de conhecimentos do cidadão não especializado em Ciências.

Também este marcador faz uma **articulação entre o novo e o antigo (Regra III)** já que reorganiza elementos das teorias clássicas (como, por exemplo, movimento circular, aceleração centrípeta, ondas eletromagnéticas, etc.) na velha teoria quântica, sendo assim possível trabalhar o Princípio da Correspondência, raramente feito no ensino tradicional da Física.

Além de várias discussões que possam vir a ser fomentadas, este saber propicia a criação de atividades e exercícios com o tipo de **operacionalidade** comum ao ensino da Física Clássica, com a produção de exercícios do tipo numérico, de resposta única e, principalmente, com uma matemática acessível aos alunos do Ensino Médio das escolas brasileiras. Como as atividades e avaliações desenvolvidas até este momento do curso foram pautadas em aspectos qualitativos e com uma margem mais ampla para a subjetividade dos alunos, optamos trabalhar este marcador com a forma de operacionalização mais tradicional. Desta maneira elaboramos questões sobre transições eletrônicas para serem trabalhadas em sala de aula (p.44 e p.68 do anexo) e aplicamos uma prova com ênfase na análise quantitativa (p.65 do anexo).

Durante a realização das atividades deste marcador percebemos que os alunos tornaram-se mais tranquilos, pareciam mais à vontade, menos receosos do que quando da realização das atividades anteriores. Talvez isto tenha ocorrido pelo fato de estarem mais habituados com esse tipo de atividade (exercícios, cálculos etc.), que mais se assemelhava ao que lhes foi imposto no ensino da Física durante os outros anos de sua vida escolar.

Curiosamente, esta forma de operacionalização talvez indique porque este conteúdo está presente no Saber a Ensinar de Química que, diferentemente da Física, já conseguiu introduzi-lo no Ensino Médio.

Como já exposto, a operacionalidade está diretamente ligada à regra da Transposição Didática que parece possuir a maior relevância para a inserção e, principalmente, a manutenção de um saber na sala de aula. Assim, ainda que o modelo atômico de Bohr não esteja presente nas aulas de Física, pode-se notar que a capacidade deste saber em **propiciar exercícios e problemas (Regra IV)** indica uma maior chance de sua sobrevivência no contexto escolar, já como ocorre no ensino de Química.

Porém, para Arons (1997), esta inserção no domínio da Química se deu de uma forma que não possibilita o entendimento, conduzindo apenas à memorização de resultados, sem qualquer significação para os alunos. Logo, ao invés disso, procuramos fazer com que a seqüência que criamos possibilitasse aos alunos perceberem estes conceitos coerentemente. Então, ela foi estruturada de forma que não servisse apenas à construção de respostas mnemônicas, apelando para a simples memorização. Por meio da seqüência desenvolvida, discutiu-se a estrutura atômica a partir da necessidade da quantização da energia, surgida no estudo dos espectros, mostrando a distribuição eletrônica dos átomos de forma contextualizada e justificada, diferentemente do que ocorre no ensino tradicional da Química. Assim, com a espectroscopia e o modelo de Bohr, foi possível resgatar também o que os estudantes viram nas aulas de química.

Esta conexão tem um grande valor pois em geral, os alunos percebem a química como outro universo, fruto da fragmentação do ensino presente nas escolas. Os alunos acabam por considerar que as características de um mesmo objeto físico são diferentes quando estudadas por disciplinas distintas, como se, por exemplo, o “elétron da Física” fosse diferente do “elétron da Química”. As dificuldades de compreensão advindas desta desarticulação disciplinar foram constatadas por Taber (2004) que procurou, por meio de entrevistas, perceber como os alunos se relacionavam com os conceitos presentes nas duas disciplinas. Quando uma das alunas (Debra) em uma aula de química, foi inquirida sobre o processo de transição

entre os níveis discretos de energia, ela disse não saber se era possível excitar um átomo. Porém ele resolve fazer novamente a pergunta, agora referindo-se à análise espectral que havia sido feita em uma aula de física. Ela, então, conseguiu responder. Para Taber:

Claramente Debra teve o conhecimento de como os átomos poderiam ser excitados representado em sua estrutura cognitiva, mas isto não foi ativado pela pergunta original, talvez porque ela percebeu o contexto da entrevista como "química." Quando uma sondagem específica indicou que Debra considerou que o conhecimento "física" estava sendo buscado, então sua representação deste conhecimento foi ativada. A expressão cotidiana seria que o conhecimento designado não era inicialmente "trazido à mente" [...] Este é um exemplo de um impedimento por fragmentação de ensino, já que a aprendizagem anterior, algo assumido pelo professor, não é reconhecida pelo estudante. (TABER, 2004, p.8).

Logo, pode-se encontrar complicações adicionais no ensino de modelos atômicos, pois o estudante pode não saber como se relacionar com este tema já que *"o assunto é "reivindicado" pela química e física, assim – talvez inevitavelmente – este tópico pode ser visto de dentro de perspectivas bastante diferentes por estas duas disciplinas"*. (TABER, 2004).

Em nosso curso, durante a explicação do modelo de Bohr, os alunos ficaram surpresos, sendo comum ouvir "isso parece química", ou perguntarem se as camadas eletrônicas que estudam na química estavam relacionadas com os níveis de energia deste modelo. A surpresa se dava ao descobrirem que aquele elétron estudado na química era o mesmo agora visto na Física, como se antes fossem dois "seres" diferentes. Com isso, foi possível, então, estabelecer uma **articulação entre o saber novo com o antigo (Regra III)**, porém conectando conteúdos que, aos olhos dos alunos, são pertencentes a disciplinas diferentes.

Também foi possível, com a introdução do modelo de Bohr neste ponto da sequência didática, fazer com que os estudantes percebessem, sem o dogmatismo tradicional, as dificuldades que originaram a crise da Física Clássica e seu total desacordo com os primeiros passos da nova física que surgia, a Teoria Quântica. Assim sendo, juntamente com a discussão criada desde a primeira aula, é possível que o modelo de Bohr seja utilizado como peça fundamental para se desfazer a imagem acumulativa e linear que a física é comumente ensinada nas escolas. Este marcador é passível de mostrar não somente as rupturas com a Física Clássica, mas

também é capaz de revelar a transitoriedade dos modelos, já que este modelo bem sucedido inicialmente fora quase totalmente suplantado.

Assim, foi preciso explicitar que atualmente há teorias e modelos considerados mais adequados do que o proposto por Bohr naquele momento da história, modelos atômicos que se aproximam ainda mais daquilo que os cientistas acreditam ser a estrutura de um átomo. Os alunos foram informados de que mesmo com o grande avanço alcançado pela teoria atômica de Bohr para compreensão da estrutura do Hidrogênio, inúmeras perguntas continuaram sem respostas. Por exemplo, quanto à descrição dos estados de átomos com mais de um elétron, como o átomo de Hélio, que mesmo possuindo somente dois elétrons já é impossível de ser descrito pelo modelo atômico de Bohr. Então, este marcador mostrou-se um instrumento didático útil desde que os alunos fossem conscientizados de suas limitações, e de que esta representação não é, de forma alguma, uma cópia da realidade, **atualizando o saber (Regra III)**, dispensando a visão obsoleta da ciência como algo acabado.

Com referência à **atualidade biológica**, presente na teoria da Transposição Didática, o modelo de Bohr seria inadequado, visto que foi há décadas superado. Contudo, como uma ferramenta pedagógica, este modelo atômico funcionou como ponto de partida para a inserção dos principais conceitos da Física Quântica mantidos até nos atuais modelos que o suplantaram: a descontinuidade dos níveis de energia, a conceituação de estados excitados e estado fundamental e o Princípio da Correspondência (EISBERG e RESNICK, 1986; FORD, 2004).

Logo, parece-nos haver uma necessidade de discussão acerca da atualidade biológica como característica presente nos saberes inseridos nas salas de aula. Para ARONS, há uma grande, porém compreensível, pressão para que os conceitos abstratos presentes nos tópicos de FMC sejam ensinados cada vez mais cedo. Entretanto, ele faz a seguinte advertência:

Considerando o que temos aprendido nos anos recentes sobre o desenvolvimento cognitivo e a formação dos conceitos, duvido que um entendimento e uma aprendizagem genuína de tal material são possíveis nestas fases iniciais. O sujeito cultivaria só uma memorização cega de resultados finais para serem usados em exercícios artificiais de lições de casa e para serem testados no que Eric Rogers chamava "recordação barata" (cheap recall). O conhecimento e entendimento não residem em uma série de nomes como "quark", "gluon", "neutrino", "charm" ou "função de onda". Quando as perguntas "Como nós sabemos...? Por que nós acreditamos...?" não são consideradas, nenhuma aprendizagem genuína e entendimento podem ser alcançados. Eu duvido que seja sábio para nós sucumbirmos à pressão do

tema (como tantos químicos fizeram, por exemplo) e forçar nossos estudantes a memorizarem resultados finais sem entendê-los. (ARONS, 1997, p. 265).

Desta forma, no desejo de ensinar de maneira significativa e não simplesmente transmitir uma enorme quantidade de informações, acreditamos que o ensino da Física Moderna no Ensino Médio revela uma imposição pedagógica da inserção, pelo menos neste momento, de modelos biologicamente desatualizados, visto que os modelos atuais estão extremamente distantes dos alunos, gerando uma imensa incapacidade de criação de representações apropriadas para este nível dos estudantes. Logo:

“O átomo de hidrogênio de Bohr é, claro, um modelo essencialmente *ad hoc* e não é o resultado de uma poderosa síntese teórica. A teoria que chamamos de “mecânica quântica” evoluiu mais tarde. Porém, isto não faz o modelo de Bohr pedagogicamente inútil. Muito de seu vocabulário e insight físico é mantido ainda hoje. Sua inteligibilidade para estudantes provê um passo racional para insights modernos”. (ARONS, 1997, p. 300).

Assim, o modelo de Bohr, mesmo sem ser biologicamente atual, ajuda na compreensão de vários aspectos relevantes para a apreensão de elementos fundamentais da Física Quântica, como a quantização de energia, a discussão sobre os estados excitados e a interação da radiação com a matéria. Além disso, a partir dele, pode-se compreender, de uma forma adequada aos alunos do Ensino Médio, os processos tecnológicos presentes em seu cotidiano (por exemplo, os processos de excitação e relaxação dos átomos na emissão da luz de uma lâmpada fluorescente, ou a capacidade de “clareamento” das substâncias opticamente sensíveis presente nos alvejantes e saponáceos, o funcionamento do laser e dos semicondutores etc.). Esta relação com a tecnologia ressalta sua **atualidade moral**, visto que a sociedade passa a considerar como importante a presença desse tipo de saber no ambiente escolar.

Também é possível tratar o problema do colapso do átomo, e consequentemente a ruptura com a Física Clássica, revelando a dinâmica da ciência em uma discussão possível de ser acompanhada por esses alunos, **modernizando (Regra I) e atualizando o saber escolar (Regra II)**.

Como exposto no início deste marcador em relação à utilização das analogias, apresentamos as transições eletrônicas do modelo de Bohr de forma análoga a torcedores ocupando arquibancadas em um estádio, de forma que cada torcedor só poderia ocupar seu lugar de forma quantizada. Quanto aos níveis contínuos de energia, apresentamos uma analogia com um ciclista em um velódromo, já que este

não tem “órbitas” proibidas, podendo ocupar qualquer lugar na pista (p.40-45 do anexo).

Contudo, tanto o uso de modelos clássicos quanto o emprego das analogias no ensino de Física Moderna no Ensino Médio devem ainda ser profundamente estudados, de maneira que os resultados das pesquisas possam vir a contribuir efetivamente na transposição das teorias contemporâneas para a sala de aula.

Como estávamos cientes dos riscos do emprego das analogias, durante a confecção do curso, foi extremamente custoso optarmos por esta abordagem. Neste instante a teoria da Transposição Didática tranqüilizou-nos visto que as modificações e transformações sofridas por um saber devem também ser capazes de minimizar as dificuldades do conteúdo, principalmente devido à complexidade de sua linguagem (neste caso, matemática) tornando-o mais compatível com o grau de entendimento dos alunos. Logo, no desejo de **tornar um conceito mais compreensível (Regra V)** consideramos adequada a utilização das analogias para o auxílio da compreensão do modelo de Bohr e, posteriormente, a quantização de energia.

Mesmo que impossibilitados devido à escassez de tempo, percebemos que com este marcador foi possível suscitar discussões epistemológicas mais profundas como, por exemplo, se o que restou do modelo de Bohr nas transformações que sofreu significa um pedaço da realidade apreendida pelos cientistas. Assim, ricos debates sobre a criação da ciência e sua relação com o universo que procura descrever podem ser acalentados, propiciando um conhecimento mais profundo e significativo da Física e de seus objetos.

MARCADOR IV – EFEITO FOTO ELÉTRICO

Para perceber as contribuições fornecidas pela Física Quântica para a modificação radical de nossa compreensão dos fenômenos clássicos, achamos imprescindível que os alunos “sentissem” o choque que surge da necessidade de considerar a luz de maneira totalmente oposta daquela que havia sido considerada até este momento, mergulhando assim no problema enfrentado pela Física, e que viria modificá-la para sempre. Acreditamos que se os estudantes não “tomarem parte” desse problema, como não são especializados em ciências, eles não se sensibilizam o suficiente para perceber as profundas modificações impostas pela Teoria Quântica, algo que um físico claramente percebe. Sem essa sensibilização, é muito provável que a aquisição desse conhecimento se dê de maneira meramente informativa, como mais um elemento a ser utilizado durante a execução do Contrato Didático.

Assim, ao final deste marcador, iniciamos o estudo da natureza da luz proposta pela física quântica, culminando na dualidade onda-partícula.

IV.1 Descrição da atividade:

O efeito fotoelétrico foi inserido por meio de uma simulação de computador, juntamente com uma aula expositiva. As atividades se resumem a resoluções de problemas qualitativos e quantitativos.

IV.2 A análise

Inicialmente foi planejada a inserção do modelo corpuscular da luz apresentando o efeito fotoelétrico por meio de um experimento onde seria possível explorar a descarga de um eletroscópio quando iluminado por diferentes lâmpadas. Esta escolha foi determinada após análise de algumas montagens experimentais disponíveis na literatura. Um excelente trabalho sobre o efeito fotoelétrico (SILVA, 1993) tem o inconveniente de utilizar um eletroscópio com extrema dificuldade de confecção. Porém, nos forneceu as informações necessárias para a construção da fonte de ultravioleta que utilizamos. Também foi possível encontrar trabalhos elaborados por pesquisadores de ensino de física, mas com um nível técnico que consideramos inapropriados para uma sala de aula de uma escola pública do Ensino Médio nacional (TAVOLARO & CAVALCANTE, 2003)

A atividade aplicada na sala de aula consistia em carregar por contato um eletroscópio de folhas e iluminá-lo com uma lâmpada incandescente, lâmpadas com filtros azul e vermelho e, finalmente, com uma lâmpada ultravioleta, observando o que acontecia com suas lâminas⁴³. Infelizmente, esta atividade não pôde ser realizada no momento da pesquisa devido a uma série de complicações externas. Entretanto, com a continuidade do projeto de pesquisa, neste ano de 2005, ela foi executada com sucesso em uma outra escola pública do Ensino Médio, revelando sua aplicabilidade em sala de aula.

A intenção principal era mobilizar os alunos para a compreensão de um efeito que só pode ser explicado ao se considerar a luz como partícula, vindo a se opor totalmente à visão ondulatória que fora, até aquele momento, ensinada. Este marcador tem um compromisso com a ciência **consensual**, sendo atualmente aceito na comunidade científica, e possui um lugar de destaque no âmbito do Saber Sábio, seja por sua importância teórica, histórica ou por suas aplicações tecnológicas. Entretanto, no ambiente escolar, ele adquire outro status, de modo que sua pertinência e importância não são claramente percebidas pelos estudantes.

Assim, não só a abordagem escolhida para o tema, como até mesmo o arranjo experimental adaptado para iniciar a discussão sobre o efeito fotoelétrico é fruto da **criatividade didática**. Obviamente que não consideramos que esta atividade seria suficiente para que os alunos percebessem o comportamento corpuscular da luz. Mas ela seria o ponto de partida para a compreensão do efeito fotoelétrico, já que os estudantes perceberiam que, de alguma forma, a luz é capaz de descarregar o eletroscópio. Assim, esta simples atividade pôde assumir um lugar de destaque dentro da sequência por nós elaborada já que pode apresentar o efeito fotoelétrico excluindo os jargões e termos técnicos comuns aos cientistas e, assim, por meio de uma linguagem acessível, compatível com o entendimento dos alunos, foi possível **tornar um conceito mais compreensível (Regra V)**.

Ao perceberem que somente a luz ultravioleta é capaz de descarregar o eletroscópio, passa-se para o uso de uma simulação computacional⁴⁴, para que se faça o aprofundamento das características principais do efeito fotoelétrico, bem como para explorar detalhadamente as relações existentes nesta interação da luz com a matéria. Elaboramos um pequeno roteiro para guiar as observações dos alunos (p.52

43 Esta atividade foi retirada de Silva (1993).

44 A simulação encontra-se em: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/fotoelectrico/fotoelectrico.htm>

do anexo), visto que sem ele achamos que a atividade seria comprometida. Para a sistematização do tema, foi empregada uma apresentação em Power Point, e vários exercícios foram aplicados na tentativa de sanar eventuais dúvidas (p.51 do anexo)

Devido à complexidade técnica envolvida na construção de um experimento mais elaborado para a inserção do efeito fotoelétrico no Ensino Médio, a informática torna-se uma boa alternativa. Após a popularidade dos computadores nas últimas décadas, sua utilização tornou-se alvos de inúmeros trabalhos. Gaddis (2000), por exemplo, faz um levantamento das principais justificativas para o uso das simulações e animações no ensino e ainda as categoriza por grau de interação com os alunos.

No caso específico do efeito fotoelétrico, a simulação substitui o experimento real e, assim, o computador pode ser utilizado como um instrumento para a construção do conhecimento propiciando um estudo mais aprofundado do conteúdo e promovendo a integração e participação dos alunos neste processo. Um aspecto fundamental deste tipo de animações e simulações é a possibilidade de “embutir” o formalismo matemático inacessível aos alunos no momento de sua construção. Ainda que nos falte dados empíricos em relação à aprendizagem, percebemos que esta característica do ambiente computacional pode **tornar um conceito mais compreensível (Regra V)**, vez que fornece a possibilidade da apresentação inicial do efeito fotoelétrico sem o instrumental matemático e as complicações técnicas do experimento real. Desta forma, estas novas mídias aparecem como potenciais alternativas para uma transposição didática dos temas modernos.

Entretanto, a seleção da simulação exigiu bastante tempo, já que a encontramos por meio de uma busca na Internet. Infelizmente, a imensa maioria de simulações disponíveis na rede é extremamente técnica, exigindo um grau elevado de conhecimento de Física para a sua utilização, tornando-a inadequada à realidade do Ensino Médio. Além disso, o principal problema é a ausência de qualquer proposta didática ou pedagógica a elas associadas (PIETROCOLA e BROCKINGTON, 2003). É preciso ressaltar que estas simulações, como objetos oriundos da **criatividade didática**, devem explicitar suas funções pedagógicas ou corre-se o risco de tornarem-se meras distrações. Ainda assim, este marcador vislumbra a possibilidade de um novo tipo de operacionalização. É possível transformar as simulações em avaliações formais, onde ao invés da prova o aluno deve resolver um problema experimental virtual. Com isso, pode-se adequar o saber e estas novas mídias ao novo ambiente escolar, transformado pela informática.

Em relação à operacionalização, o efeito fotoelétrico permite a criação de uma miríade de exercícios, revelando uma versatilidade que fornece um alto grau de **operacionalidade**. Seu contexto é tão rico que suporta desde os exercícios convencionais, do tipo numérico, até a utilização da História da Ciência.

Pode-se, por exemplo, elaborar questões conceituais de modo que seja possível rever os conceitos envolvidos no experimento e na simulação, levando os alunos a perceberem as principais implicações para a compreensão da natureza da luz advindas da hipótese criada por Einstein. Os estudantes têm a chance de perceber que

O ingrediente mais importante para uso posterior é, claro, a relação linear entre o potencial de corte e a frequência da luz monocromática incidente, com uma determinada frequência para cada metal diferente. (ARONS, 1997, p. 289).

Acreditamos que nossa sequência permitiu que os alunos vislumbassem as características inusitadas da Teoria Quântica. Transcrevemos abaixo uma questão, juntamente com algumas respostas dos alunos, onde eles puderam se expressar sobre um ponto complexo e fundamental acerca do fóton e da própria luz. Esta questão constava da prova final, aplicada um mês após a aplicação deste marcador.

3 - A energia de cada fóton é dada pela relação $E=h\nu$. Porém, a frequência (ν) é uma grandeza característica das ondas. Como você explica que se usa uma grandeza ondulatória para determinar a energia de uma partícula?

P₃(3)1: Podemos explicar que os fótons são pequenos “pacotinhos” de ondas dentro da luz. E cada pacotinho desse possui uma frequência, fica a frase: “Não podemos explicar a luz como partícula sem citarmos as ondas”.

P₃(3)2: Isso é incoerente usar uma relação usada em ondas ser usada na partícula. Talvez a luz seja uma onda e uma partícula, seja composta pela mesma coisa.

P₃(3)3: Por que uma onda seria a união de varias partículas com essa união obtemos uma frequência.

P₃(3)4: Seguindo a teoria dualista realista é possível que haja elementos ondulatórios em uma partícula de luz.

P₃(3)5: Pela interpretação dualista-realista, onde uma partícula é associada à uma onda, logo, a frequência da onda determinará a energia da partícula.

P₃(3)6: Eu poderia explicar isto usando a teoria dualista realista, e também poderia ser mais objetiva, dizendo que o fóton não é necessariamente uma partícula, e também não é obrigatoriamente uma onda. Por isso o porque de se usar uma grandeza ondulatória para determinar a energia de uma partícula de fóton. É por causa desta grande confusão em volta das 4 teorias e desta grande confusão que é a física.

P₃(3)7: Como a física não determinou nada muito concreto de certo para podermos dar uma resposta concreta, a teoria dualista-realista se encaixa nessa explicação, uma vez que é através das ondas que uma partícula decide para onde ela vai.

A partir destas respostas, parece-nos possível discutir, de maneira adequada ao Ensino Médio, questões mais sofisticadas acerca da natureza da luz. As discussões, geradas a partir do “choque” que os alunos sentem ao serem apresentados ao efeito fotoelétrico, tornam-se ricas, ganhando em profundidade, revelando que este marcador tem um grande potencial para sensibilizá-los, fazendo-os tomarem parte do debate sobre a dualidade onda-partícula. Pode-se perceber que alguns alunos utilizaram até mesmo as interpretações da quântica que serão analisadas no próximo marcador, evidenciando que se apropriaram de modo bastante satisfatório destes elementos teóricos a eles apresentados.

Este marcador, então, possui a capacidade de gerar questões conceituais fundamentais, com maior flexibilidade de avaliação, bem como propiciar a construção de exercícios que possuem a operacionalidade tradicional, já que os alunos podem manipular a matemática necessária para compreender a equação proposta por Einstein. Pode-se, com isso, criar exercícios numéricos onde o aluno, por exemplo, deve encontrar a frequência capaz de arrancar elétrons de metais com diferentes valores de função trabalho ou encontrar o potencial de corte para uma determinada frequência.

Assim, à luz da Transposição Didática, o efeito fotoelétrico tem grandes possibilidades de sobreviver no contexto escolar já que neste caso é possível facilmente **transformar um saber em exercícios e problemas (Regra IV)**.

Outra característica relevante para a presença deste marcador no contexto escolar diz respeito a sua atualidade. Além da **atualidade biológica**, o efeito fotoelétrico permite explorar, no âmbito do Saber Ensinado, sua **atualidade moral**. Os

alunos foram apresentados às inúmeras aplicações do efeito fotoelétrico em seu cotidiano. Discutiram-se as inovações tecnológicas possíveis a partir desse efeito e muitos ficaram surpresos ao saber que nele se baseia o funcionamento de inúmeros dispositivos eletrônicos presentes em seu dia-a-dia. Também foi possível desfazer uma confusão existente entre as células fotoelétricas e as células solares ou fotovoltaicas.

Configura-se assim sua importância social já que é utilizado cada dia mais nas tecnologias presentes no mundo atual. Como a sala de aula possivelmente é o único ambiente onde estes estudantes trarão contato com estes temas, a inclusão deste marcador na grade escolar é capaz de **atualizar o saber a ensinar (Regra II)**, renovando o currículo.

Desta forma, este marcador também possibilita **modernizar o saber (Regra I)**, sendo possível, a partir dele, discutir conteúdos mais próximos do ambiente científico, como o efeito fotoelétrico interno, e desta forma pode-se criar condições para se estudar profundamente os semicondutores com suas inúmeras aplicações (ainda que tenhamos optado, por carência de tempo, em não focar este aspecto no curso, essa possibilidade parece-nos extremamente plausível). Assim, ele mostra uma grande versatilidade, possibilitando a construção de vias alternativas de modernização do saber escolar. Pode-se, então, utilizá-lo como ponto de partida para a criação de outra estrutura e seqüência que não tenha como objetivo chegar ao tratamento da dualidade onda-partícula, como foi a escolha que fizemos.

O efeito foto elétrico, em nossa seqüência, executa também o papel de **articular o saber novo com o antigo (Regra III)**. Ainda que se possa argumentar que, neste caso, o modelo de Bohr pode não ser considerado antigo, é inegável que este marcador faz uma conexão entre os saberes. A partir dele reforça-se a idéia da quantização que aparece no átomo de Bohr, articulando um saber já ensinado com o novo a ser inserido. Mostramos que neste modelo os elétrons ficam em um estado energético estacionário, sem emissão de energia eletromagnética, a não ser quando interagem com um agente externo. Assim, os alunos podem perceber que os elétrons fazem uma transição eletrônica quando fótons, que possuem uma energia discreta, com eles interagem. Logo, além da articulação entre os marcadores, o efeito fotoelétrico também colabora para tornar o modelo atômico de Bohr mais compreensível (**Regra V**).

Além desta articulação, outro aspecto extremamente importante deste marcador é o elo com a discussão sobre a dualidade onda-partícula. Como exposto anteriormente, nossa intenção era, de alguma forma, chocar os alunos para que estes percebessem, de maneira significativa, as implicações da concepção corpuscular da luz imposta pelo efeito fotoelétrico. Parece-nos que obtivemos um bom resultado nesta forma de apresentação, visto que os alunos revoltaram-se ao perceber que a luz agora deveria também ser concebida como uma partícula. Foi comum que os alunos externassem esse conflito, mostrando que se sentiram realmente desconfortáveis com a nova visão imposta à luz. Para ilustrar, citamos um momento no qual, um dos alunos mais exaltados, pressiona a professora:

A: Professora, você ficou louca?? O que aconteceu da semana passada pra cá?? Estudou mais e resolveu mudar de idéia, foi isso??

Assim, percebemos que este marcador “prepara o terreno” para uma discussão mais profunda não só sobre a natureza da luz, como, principalmente, acerca da ciência como um todo e de seu processo de construção. Surge neste momento a necessidade do professor estar preparado para lidar com a epistemologia e a história da ciência.

Notamos que é preciso que haja um domínio mínimo da História da Ciência para que não se insira o trabalho de Einstein como elaborado simplesmente para solucionar os problemas surgidos com o efeito fotoelétrico, como, infelizmente, é inserido pela maioria dos autores de livros didáticos (MARTINAND, 1986; JONES, 1991). Deve-se procurar deixar claro que a hipótese do quantum de luz formulada por Einstein era uma afirmação sobre uma propriedade quântica da radiação eletromagnética. Assim, o princípio heurístico⁴⁵, presente no título de seu trabalho, pode ser aplicado ao efeito fotoelétrico, já que é uma extensão desta propriedade da luz quando da interação com a matéria.

Com isso, tem-se, por exemplo, ao se tratar da relação linear entre a frequência e o potencial de corte, a oportunidade de fazer com que os alunos percebam que

[...] esta relação linear não estava entre as observações originais do efeito fotoelétrico, embora alguns livros texto dizerem que era. Einstein predisse a

⁴⁵ “O princípio heurístico: Se, no tocante à dependência da entropia em relação ao volume, a radiação monocromática (de densidade suficientemente baixa) se comporta como um meio discreto constituído por quanta de energia [...], então tal fato sugere que se investigue se as leis da produção e conversão de luz também são estabelecidas como se a luz consistisse de quanta de energia desse tipo.” (EINSTEIN *apud* PAIS, 1982, p.447)

relação linear, junto com sua agora familiar interpretação, e isto precisou ser confirmado [...] e a final e definitiva confirmação foi feita por Millikan. (ARONS, 1997, p. 289).

Acreditamos também que é preciso revelar aos alunos que

Na primeira metade do século ou nos anos seguintes, nunca uma nova partícula encontrou resistência tão grande e tão prolongada como o fóton. Mesmo cientistas proeminentes – que, além do mais, tinham por Einstein a mais alta estima – consideraram a hipótese do quantum de luz como algo próximo a uma aberração. (PAIS, 1982, p. 427).

Desta forma, os alunos têm a chance de ficarem sabendo do isolamento sofrido por Einstein ao propor sua teoria sobre a radiação eletromagnética livre. Surgem assim ricos episódios históricos capazes de contribuir para mudar a visão de ciência deformada presente no Saber a Ensinar e no Saber Ensinado.

Assim, ao relatar o fato de Robert Andrews Millikan ter passado pouco mais de 10 anos testando a hipótese proposta por Einstein, no intuito de provar que estava errada, mas que ao final de seus trabalhos, acabou ganhando o prêmio Nobel, em 1916, justamente porque os resultados de suas pesquisas contrariaram suas expectativas, confirmado a teoria que há uma década tentava derrubar (SEGRÈ 1982; PAIS, 1982), pode-se apresentar aos estudantes um pouco da fabricação da ciência, revelando suas complexidades e, até, ironias. Os alunos podem, então conhecer algumas das dificuldades enfrentadas por Einstein, que raramente são abordadas nos livros didáticos, como se sua teoria tivesse sido aceita de forma unânime e tranqüila. Surge assim a possibilidade deles virem a saber, por exemplo, que mesmo após confirmar os trabalhos de Einstein, Millikan fez a seguinte afirmação:

A equação de Einstein para o efeito fotoelétrico [...] parece prever com exatidão, em qualquer caso, os resultados observados [...]. Porém, a teoria semicorpuscular, através da qual Einstein chegou à equação, parece neste momento totalmente indefensável. (MILLIKAN *apud* PAIS, 1982, p.453).

Da mesma forma, pode-se mostrar que o próprio Planck não estava ainda preparado para aceitar o raciocínio de Einstein, tanto que ao indicá-lo para a academia de ciências da Prússia proferiu as seguintes palavras:

[...] pode-se dizer que dificilmente haverá um entre os grandes problemas em que a física moderna é tão rica para o qual Einstein não tenha dado uma contribuição notável. O fato de, por vezes, ter errado o alvo em suas

especulações, como, por exemplo, em sua hipótese dos quanta de luz, não pode ser esgrimido demais contra ele, pois não é possível introduzir idéias realmente novas, mesmo nas ciências mais exatas, sem algumas vezes correr riscos. (PLANCK *apud* PAIS, 1982, p.453).

Criam-se, assim, condições de mostrar aos alunos, diferentemente do que convencionalmente apresenta-se, que

O ponto capital é que, mesmo depois de a lei de Einstein do efeito fotoelétrico ter sido aceita, quase ninguém, a não ser o próprio Einstein, queria ter algo a ver com os quanta de luz. (PAIS, 1982, p. 457)

Esse episódio contribui para revelar a face humana da ciência, raramente apresentada no Ensino Médio. Trabalhar o efeito fotoelétrico desta maneira também conduz à desconstrução do mito do cientista genial, neutro, totalmente desprendido de preconceitos, estereótipo fortemente vinculado à figura de Einstein.

Ao travar esta discussão, tem-se a chance de fazer com que se perceba o que levou a comunidade científica a rejeitar, tão fortemente, as idéias de Einstein. Com isso, é possível ressaltar o papel das teorias e modelos na ciência, mostrando que

[...] quando Planck introduziu o quantum para descrever as propriedades espectrais da radiação pura, fê-lo por um processo de quantização aplicado à matéria, aos seus osciladores materiais. Ele ignorava que sua proposta implicava a necessidade de rever o próprio campo clássico da radiação. Seu raciocínio declarado envolvia apenas uma modificação na interação da matéria e radiação. Isto não pareceu muito irrealista, pois, de qualquer modo, o problema da interação estava cheio de obscuridades. Em contrapartida, quando Einstein propôs o quantum de luz, ousou mexer nas equações de Maxwell para os campos livres, consideradas, com boas razões, como muito mais bem compreendidas. Por conseguinte, pareceu muito menos repugnante aceitar os devaneios de Planck do que os de Einstein. (PAIS, 1982, p. 455).

O aprofundamento das discussões também pode contribuir para que se perceba o papel da experiência na aceitação das teorias, além de deixar claro que a natureza dual da luz já se mostrava, nesse período, um fator complicador para os físicos da época, já que

[...] a enorme resistência aos quanta de luz encontrou suas raízes nos paradoxos onda-partícula. A resistência se tornou maior porque a idéia do

quantum de luz parecia lançar por terra aquela parte da teoria eletromagnética que se supunha ser mais bem compreendida: a teoria do campo livre. Além disso, o suporte experimental demorou a chegar. E, mesmo depois de as previsões do efeito fotoelétrico terem sido verificadas, os quanta de luz permaneceram sendo amplamente considerados inaceitáveis. (PAIS, 1982, p. 457).

Este marcador, pode então **modernizar o saber (Regra I)** visto que possibilita a inserção de uma visão de ciência mais adequada, menos neutra, focando em seu processo dinâmico de construção e fazendo com que o cientista seja visto como um ser humano, repleto de crenças pessoais, conflitos e desejos. Entretanto, deve ser ressaltado que

[...] não é possível seguir a seqüência histórica com rigor de detalhes. O tempo exigido seria excessivo, e muitos elementos conceituais e matemáticos estão em um nível muito distante de um curso introdutório. Porém, é bastante possível formar uma seqüência [...] usando segmentos apropriados do desenvolvimento histórico mantendo plausibilidade e continuidade. (ARONS, 1997, p. 280).

Assim, é imprescindível que, neste momento, tome-se o cuidado de mostrar que a seqüência apresentada aos alunos é artificial, havendo uma séria inversão cronológica, já que os trabalhos de Einstein vieram antes das propostas de Bohr. Esta reconstrução histórica é fruto da necessidade da nova estruturação do saber, agora transposto de seu contexto original. Ao revelar este aspecto artificial da seqüência, diminui-se a chance de transmitir aos alunos uma visão linear e acumulativa do conhecimento, deixando claro que a forma apresentada é puramente uma ferramenta pedagógica.

MARCADOR V – DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Como exposto na análise do marcador anterior, após trabalharmos e discutirmos o efeito fotoelétrico, foi possível que os alunos percebessem as complicações surgidas a partir do rigoroso estudo da natureza da luz. Para isso, contribuíram fortemente o relato do isolamento do próprio Einstein na defesa do conceito dos *quanta*, além do desconforto gerado nos próprios alunos com a necessidade de se conceber a luz também como partícula.

Mobilizados para a discussão acerca da natureza dual da luz, e no intuito de fazê-los apreciar as profundas implicações filosóficas e epistemológicas oriundas da Teoria Quântica, optamos por trabalhar o interferômetro de Mach-Zehnder, discutindo os resultados experimentais, e apresentar as quatro possíveis interpretações da natureza da luz, contidas no livro *Conceitos de Física Quântica*, de Osvaldo Pessoa Jr (2003).

A idéia era mostrar que, com a explicação do efeito fotoelétrico e, necessariamente, com o tratamento da luz como partícula, tem-se um impasse sobre a sua natureza, bem entendida até então como onda. Com isso, o interferômetro de Mach-Zehnder é inserido como uma possibilidade criada pelos cientistas na tentativa de resolver este impasse, conseguindo determinar, a partir do comportamento da luz neste aparato experimental, sua verdadeira natureza.

Temos aqui um ponto alto do curso, visto que é possível tratar a dualidade no Ensino Médio, fazendo do desenvolvimento dos resultados obtidos nesse interferômetro o ápice da discussão, utilizando o trabalho de Mach-Zehnder de uma maneira totalmente nova e iniciando o seu estudo a partir de uma metáfora.

Depois de uma árdua pesquisa, não tomamos contato com nenhum experimento que consideramos capaz de gerar algum resultado inteligível e, principalmente, significativo para os alunos de nível médio. Esta dificuldade é compreensível, devido à complexidade de confecção de um aparato experimental como o interferômetro⁴⁶.

Sendo assim, na tentativa de **tornar um conceito mais compreensível (Regra V)**, optamos por confeccionar uma metáfora para que fosse possível iniciar esta discussão com os alunos, temendo que a simples apresentação do interferômetro de Mach-Zehnder e a interpretação dos resultados obtidos tornassem-se simplesmente um conjunto a mais de informações, não gerando condições para que

⁴⁶ Dificuldade vivenciada pelo próprio professor Osvaldo Pessoa Jr., que no ano de 2004, ministrou um curso sobre os conceitos de Física Quântica para os alunos de pós-graduação em Ensino de Ciências da Universidade de São Paulo. Ao término do curso, foi montado um interferômetro de Mach-Zehnder, no regime clássico, para que discutíssemos o que havia sido trabalhado durante as aulas. Além da dificuldade de execução do experimento, o resultado final foi frustrante para a imensa maioria dos alunos, mesmo tratando-se de físicos de formação.

os alunos se apropriassem desses resultados de forma significativa. A atividade elaborada seria, então, apenas um convite para uma discussão muito mais profunda sobre a natureza da luz e os limites da ciência.

A partir disso, trabalhamos brevemente a noção de realidade na ciência, conduzindo um sucinto, mas frutífero debate acerca do realismo científico e da validade das ciências.

V.1 Descrição da atividade:

Para iniciarmos a discussão do interferômetro de Mach-Zehnder, apresentamos uma metáfora, materializada na atividade denominada Max-Gay (p.57 do anexo). Após sua execução, foi realizada uma aula expositiva na qual, por meio de uma apresentação em Power Point, inserimos o interferômetro de Mach-Zehnder e quatro possíveis interpretações da Mecânica Quântica extraídas de Pessoa Jr. (2003), além de serem realizados alguns exercícios (Bloco VII, p.54-62 do anexo).

Na seqüência, fizemos a atividade REAL x NÃO REAL, seguida da apresentação do filme “The Matrix”, fechando o curso com uma discussão sobre a ciência, realidade e o realismo científico.

A – A metáfora do “Max-Gay”

Para que a dualidade onda-partícula não fosse inserida apenas de maneira informativa, e sim de forma inteligível e, principalmente, possível de ser discutida e compreendida, apresentamos aos alunos esta atividade.

Como o intuito era “preparar o terreno” para a apresentação do interferômetro de Mach-Zehnder, elaboramos uma metáfora em que os alunos deveriam determinar se uma pessoa coberta por um lençol, sem indícios aparentes de seu gênero, era homem ou mulher, a partir de seu comportamento.

O “experimento” criado consistia de um corredor com uma bifurcação que conduzia a dois banheiros distintos, um feminino e outro masculino. A pessoa não identificada, coberta pelo lençol, deveria escolher em qual banheiro iria e, a partir desta escolha, os alunos deveriam determinar seu sexo. Com isso, objetivamos que os estudantes percebessem a possibilidade de coexistência, ou não, de características

antagônicas em um mesmo indivíduo e o possível papel desempenhado pelo observador na determinação da natureza do observado.

Inicialmente, a pessoa escolhe livremente para qual banheiro deseja ir. Neste caso, ela vai a ambos, aleatoriamente, chegando, por exemplo, a ir em 7 vezes consecutivas, 4 vezes ao banheiro indicado como feminino e 3 vezes ao masculino. Ao término, os alunos faziam suas hipóteses. As opiniões se dividiam entre masculino e feminino, e também surgia, nesse instante, a possibilidade de a pessoa ser gay.

Em seguida, como não foi possível determinar o sexo da pessoa sob o lençol, optamos por interditar um dos caminhos, forçando-a a ir somente a um dos banheiros. Agora, com o caminho para o banheiro feminino fechado, por exemplo, a pessoa se dirigia a ele todas as 7 vezes. O mesmo ocorria ao se interditar o caminho para o banheiro oposto. Mais uma vez, os alunos criam suas hipóteses sobre o ocorrido. Neste caso, as hipóteses dos alunos se concentravam na necessidade da pessoa em utilizar o banheiro, isto é, o fato da pessoa estar “apertada” determinava o uso de qualquer banheiro disponível, mesmo que não fosse aquele destinado ao seu gênero.

Por fim, deixamos os caminhos livres, como no primeiro arranjo, porém agora comunicamos aos alunos a existência de uma câmera escondida em um dos caminhos. A pessoa sob o lençol não teria conhecimento sobre esta câmera. Assim, ao colocá-la no banheiro masculino, por exemplo, a pessoa só se dirige a ele em todas as 7 tentativas. O mesmo comportamento se repete ao colocarmos a câmera no caminho do banheiro oposto. Com isso, após a “experiência” ser realizada para os dois banheiros possíveis, os estudantes explicitam suas hipóteses. Agora, eles ficam confusos. Uns afirmam que a pessoa é gay, ou hermafrodita. Outros afirmam que é um homem ou uma mulher, condicionados pela necessidade do uso. Entretanto, nenhum aluno se sente confortável por não conseguir explicar o porquê de a câmera escondida determinar o banheiro escolhido pela pessoa, determinado, assim, o seu sexo.

Esta atividade requer uma série de cuidados, que se tornam evidentes em função próprio nome, “Max-Gay”⁴⁷. Como uma das pretensões deste trabalho é a sua aplicação por qualquer outro professor, optamos por deixar claro, desde o início, o tipo de polêmica que pode ser gerado pela atividade. A idéia era não mascarar uma discussão que certamente surgirá ao aplicá-la (e é preciso que surja), de maneira que o professor que desejar utilizá-la possa, já a partir da leitura de seu nome, decidir se

⁴⁷ Este nome é um jogo de palavras, aludindo ao próprio interferômetro de Mach-Zehnder e ao voluntário que fez o papel da pessoa sob o lençol (um outro mestrando da pós-graduação em ensino de ciências) chamado Maxwell.

tem condições de tratar do tema de maneira correta, sem destilar preconceitos, ufanismos, ou seja, qualquer forma de visão pessoal.

É preciso ressaltar que a realização desta atividade foi uma decisão extremamente difícil de ser tomada. Além da preocupação de se utilizar uma metáfora no ensino de elementos da física, como já exposto anteriormente, tem-se o lado polêmico intrínseco à própria atividade.

A discussão a respeito de gêneros, utilizada como alegoria para representar a dualidade da luz, por si só requer um tratamento diferenciado, já que, mal conduzida, abre uma margem ampla para polêmicas, preconceitos e confusões.

Certamente, a própria definição utilizada por nós, considerando o homem e a mulher como gêneros opostos, já seria motivo suficiente para numerosos protestos de especialistas no assunto, visto que hoje há uma profunda interlocução entre a antropologia, psicologia e a biologia, de maneira que esta diferenciação que estabelecemos é considerada, no mínimo, equivocada. Atualmente, este tema é tratado e percebido de maneira fluida, considerado como uma construção social sendo, então, normal. Com isso, essa simples categorização de feminino e masculino como opostos é tida com artificial, não sendo aceita por diversas escolas de pensamento (HEILBORN, 1996 e 1999; LOURO, 1999; FAUSTO-STERLING, 2001).

Entretanto, é preciso deixar claro que não tivemos a intenção de discutir a sexualidade na sala de aula, ainda que esta atividade abra margem para tal, mas não há, de nossa parte, a necessidade, o conhecimento e, principalmente, a competência necessária para a condução deste assunto. Também, de forma alguma, elaboramos esta atividade com o desejo de efetuar qualquer tipo de juízo de valor, seja social, moral, político ou sexista. A idéia principal da metáfora foi retirada do próprio senso comum presente nos alunos que consideram o homem e a mulher como gêneros opostos. Assim, o objetivo era fazer com que a dualidade onda-partícula se tornasse inteligível para os alunos por meio da velha dicotomia entre o masculino e feminino. Não se teve a intenção de aprofundar discussões sobre o tema ou inserir qualquer visão ou posicionamento pessoal acerca deste assunto.

Além de ser um tema complexo, nosso receio era o de que a atividade caísse no terreno das brincadeiras, perdendo todo o sentido, o que nos levou a tratá-la com zelo e atenção ainda maiores. Entretanto, o transcorrer da atividade foi normal, com os alunos criando suas hipóteses em um clima agradável, descontraído, porém sério, discutindo a metáfora de forma responsável.

Foi comum perceber que durante a realização do Max-Gay, muitos alunos já abandonaram a idéia da metáfora, fazendo conexões com a luz. Logo abaixo, apresentamos as falas de dois alunos que podem ilustrar estas ligações:

A1: *Professora, aí tá a diferença. Por causa que a partícula não consegue ultrapassar os obstáculos. Por isso, quando a senhora fechou o banheiro masculino só entrou no feminino e quando fechou o feminino só entrou no masculino.*

Quanto ao espalhamento de uma onda, outro aluno faz, espontaneamente, a seguinte conexão:

A2: *Professora, se fosse luz ia entrar nos dois, né? Porque uma onda assim...espalha... tem que entrar nos dois, não é?*

Um fato curioso surgiu inesperadamente. Nosso “fóton”, além de coberto pelo lençol, estava com uma grande toalha enrolada na cintura para que seus pés ficassem escondidos. Isso dificultava demasiadamente seus movimentos. Quando do arranjo com a câmera no banheiro feminino, ele deveria percorrer o caminho até lá sete vezes seguidas. Com seus movimentos limitados, ele passou a andar cada vez menos até à porta do banheiro, pois só de passar pela bifurcação os alunos já sabiam qual era o escolhido. Uma das alunas percebeu este fato e disse que aquele comportamento lembrava as camadas atômicas, isto é, havia níveis diferentes de energia até o banheiro escolhido, logo o “fóton” passava gradativamente por tais níveis, justificando as diferentes distâncias percorridas por ele. Nosso voluntário ouviu a aluna e, imediatamente, fez questão de percorrer toda a distância. Ela, ao ver esse comportamento, exclama:

A3: *iiih, já era... minha teoria foi por água abaixo.*

A todo tempo, reforçamos que esta atividade tratava-se de uma analogia e que, por isso, tinha seus limites. Preocupamos-nos com que se concentrassem no que seria fundamental para a compreensão da interpretação dos resultados do interferômetro. Acreditamos que grande parte dos alunos conseguiu abandonar a parte alegórica da metáfora, focando no que seria essencial para entender e discutir a dualidade. Isto pode ser ilustrado nas respostas à pergunta abaixo transcrita, presente

em um exercício realizado em grupo, cerca de duas semanas depois da realização da atividade Max-Gay (p.67 do anexo):

2 - Como você associa esse experimento com a atividade da pessoa escondida pelo lençol?

E₃(1)1: Eu não vejo nenhuma associação por que quando a luz chega nas semi-defletores ela se divide em duas e o mesmo não acontece com a pessoa do lençol que seguia por um único caminho.

E₃(1)2: Que ela poderia ser uma onda ou uma partícula por que como no caso do lençol a pessoa não podia fazer dois caminhos ao mesmo tempo.

E₃(1)3: Pelo fato da luz ser algo indefinido, este experimento associa-se a pessoa escondida porque ela também era “indefinida”.

Luz → onda ou partícula

Pessoa → Homem ou mulher

Nos dois casos, foram feitas varias interpretações, porém nenhuma com plena certeza.

E₃(1)4: Os dois explicam que é desconhecida a definição correta em relação a luz.

E₃(1)5: É uma metáfora, mostrando o comportamento da luz que pode ser os tanto onda quanto partícula mas podem ser influenciados por um objeto externo que é a câmera.

E₃(1)6: São parecidas pois ambas tem a mesmo objetivo, descobrir qual das hipóteses está correta: se é o homem ou a mulher, se é onda ou partícula. E ambas tem resultados que podem ser contestados, não são claros.

E₃(1)7: É uma forma mais simplificada para explicar um experimento, tal como uma “analogia”. Torna-se assim mais fácil o entendimento da semelhança entre o experimento e a analogia que simplifica o entendimento do experimento.

E₃(1)8: Podemos associar pelas medidas onde ou é um ou outro pois apesar da presença da câmera a câmera não pode entrar em dois lugares ao mesmo tempo.

Assim, algumas respostas dos alunos a esta pergunta nos trazem indícios de que a atividade foi bem sucedida, já que eles conseguiram abandonar seu lado metafórico e transferir a idéia da incerteza sobre o sexo da pessoa, bem como a possibilidade de coexistência de características antagônicas em um mesmo indivíduo, para a dualidade no caso da luz.

B – A atividade “REAL x NÃO REAL”

No desejo de discutir com os alunos quais são os critérios que eles utilizam para determinar se algo é ou não real, elaboramos esta atividade.

Ela consiste em distribuir, aleatoriamente, três pequenas tiras de papel, cada uma delas contendo o nome de algo ou algum objeto (por exemplo: papai Noel, elétron, nuvem, deus, cadeira, batata, alma etc.). Após o recebimento, o aluno deve dizer em qual categoria classificá-los: real ou não-real. A professora anotava na lousa as respectivas respostas e, depois, discutia o que este aluno considerou no momento de realizar sua categorização.

Após a discussão, apresentamos o filme “The Matrix”, conectando-o com uma discussão sobre a realidade, a capacidade do homem em acessá-la, o processo de construção da ciência e sua relação com outras áreas do conhecimento.

V.2 A análise

A inserção deste marcador traz à tona os fundamentos da Física Quântica, e com a discussão feita a partir do interferômetro de Mach-Zehnder, tem-se condições de explorar diversos aspectos da ciência como um todo.

Ao inseri-lo no Ensino Médio, leva-se para a sala de aula uma discussão muito mais próxima dos conceitos acadêmicos do que usualmente é feito. Essa aproximação **moderniza o saber (Regra I)** não só em relação aos próprios conceitos de FMC intrínsecos ao tema, mas também moderniza o Saber a Ensinar ao revelar o processo dinâmico da ciência, tornando transparente as incertezas presentes nesta área da Física.

A metáfora utilizada, bem como a abordagem acerca do interferômetro de Mach-Zehnder, podem ser consideradas como objetos oriundos da **criatividade didática**, pois têm sua existência apenas no ambiente escolar. Também foi possível considerar que, como obtiveram êxito com os alunos, ainda que restrito somente a essa turma (já que ainda não temos certeza que esse sucesso seria repetido em outra classe) temos um indício do processo de **terapêutica**, revelando uma tendência de sua manutenção neste contexto.

Entretanto, algo que nos chamou a atenção diz respeito à maneira com que os alunos encararam este marcador como um todo. O fato de lidarmos com um saber **não consensual** (visto que não há hegemonia de interpretações sobre a natureza da luz) fez com que alguns alunos (deve-se ressaltar que foi uma minoria, em torno de 4 ou 5) achassem desnecessário o estudo deste tema. Esta afirmação é ilustrada por relatos extraídos da entrevista final realizada com alguns alunos:

Pesquisador: *Você viu que a gente tem quatro explicações e você tem que escolher uma das quatro. Como é que você se sente com isso?*

EF1: *Eu acho que não precisava ter dado... (risos).*

Pesquisador: *Como é?*

EF1: *Não. Estou zoando...*

Pesquisador: *Pode falar.*

EF1: *Não...é que...sei lá...Se não tem nada certo aí podia passar...*

Pesquisador: *Você viu que a gente tem quatro explicações e você tem que escolher uma das quatro. Como é que você se sente com isso?*

EF2: *Ah! Fiquei confusa é lógico. Isso confundiu bastante, por isso que eu falei. Se não tem uma resposta só, por que precisa ficar estudando? Eu acho que tem que tentar estudar para encontrar resposta, mas é impossível encontrar resposta para isso. Não tem como, porque você não tem como ver aquilo. Então sei lá. Confundiu, lógico, mas a luz acendendo, fazendo o papel dela é o que importa. Isso é importante.*

EF2: *Eu acho que não deveria ser ensinado. Já que não tem resposta...*

Assim, pode-se perceber que, como este saber possui a característica de não ser consensual, ele influi diretamente no tipo de **operacionalidade**. Logo, os próprios alunos podem considerar que não há sentido em serem avaliados sobre algo que não se tem certeza. Ao mesmo tempo, a confecção de atividades e exercícios sobre este marcador também torna-se complicada. Estes problemas advindos da operacionalidade são explicitados na Teoria da Transposição Didática, visto que para Chevallard:

O sistema de ensino parece não saber como avaliar aquilo que o aluno deve saber daquilo que a ciência ainda não sabe. (CHEVALLARD, 1991, p.69)

A operacionalidade tradicional no Ensino de Física cria nos alunos a concepção de um tipo de Física no qual não há espaço para discussões como a que fizemos. Durante toda a execução do curso isso ficou claro nas conversas informais que tínhamos com os alunos após as aulas. Era comum que eles saíssem dizendo “Nem parece aula de física”. E esta inovação em como aconteciam as aulas de Física agradou a alguns alunos, que se sentiram confortáveis com uma nova operacionalidade, mas não foi tão bem recebida por outros, que sentiram falta da operacionalidade comum no ensino tradicional.

Pesquisador: *O que você achou do curso como um todo?*

EF3: *Eu achei interessante. Como eu escrevi naquela folha... porque antes tinha aquele negócio, eu tinha uma idéia de Física como fórmula e descobri que era completamente diferente.*

Pesquisador: *O que você achou do curso como um todo?*

EF4: *Eu gostei, mas eu queria ter visto, tipo, bem mais fórmulas, porque durante o primeiro, segundo ano só foi velocidade, velocidade, velocidade e eu queria aprender outra coisa que não fosse velocidade, nem temperatura. Assim, algumas contas, né.*

Também o papel do Contrato Didático no gerenciamento do cotidiano escolar fica claro no comportamento de um dos alunos, aquele que mais explicitou suas angustias durante todo o ano ao ser exposto a um “novo” contrato. Ele sempre deixou claro que estava gostando muito do curso ao mesmo tempo em que ficava receoso de não saber lidar com uma outra operacionalidade, o que poderia lhe render um mal desempenho nas notas. O trecho da entrevista final, abaixo transcrito, revela muito de seu comportamento durante todo o ano.

Pesquisador: *O que você achou do curso como um todo?*

EF5: *Não é nenhuma coisa, tipo assim, certa. Mas assim você vê muito tipo... eu digo assim... você vê a sua vida inteira a Física como se fosse uma conta. Aí você vai mudando para o outro lado e você acha que é diferente. Você vê como se fosse uma coisa, assim, “Putz! Legal!”, mas ao mesmo tempo você fica com o pé atrás, porque você fica com medo de, tipo, você procurar mais coisa para aprender sobre isso e no final, tipo, você ir pegando, pegando e pegando e não ser o que você precisa pra ir bem nas provas.*

(...)

EF5: *Fico meio com medo, entendeu?*

Contudo, parece que o fato de não haver “a resposta” inicialmente causou estranhamento, mas, como o papel desempenhado pelos modelos na ciência fora extensamente trabalhado desde a atividade inicial, esta sensação cedeu espaço ao grande interesse e curiosidade que o tema é capaz de gerar.

Pesquisador: *Você viu que a gente tem quatro explicações e você tem que escolher uma das quatro. Como é que você se sente com isso?*

EF3: *Eu gostei. A gente não estava mais preocupado que teria certo ou errado e a dificuldade estava só em explicar. E explicar eu sei, na minha opinião, essa parte ajudou.*

Pesquisador: *Você viu que a gente tem quatro explicações e você tem que escolher uma das quatro. Como é que você se sente com isso?*

EF5: *Fiquei bolado, mano. Tem muita coisa que você faz aí que desenvolve a curiosidade. A aula fazia a gente desenvolver a curiosidade. E eu acho que a coisa que mais faz a pessoa aprender é o ato da curiosidade da pessoa.*

(...)

EF5: *Eu acho que é o certo. Não sei se eu posso dizer, mas acho que no mundo da Física é isso. Enquanto eles não conseguirem, tipo, achar a devida fórmula para isso, tem que continuar suando, se esforçando e você tem que definir sua opinião. Se você acha, tipo... Definir assim... definir, tipo... porque a Física eu acho que ela não é um enigma. A Física ela vai, tipo... tem algum x para você. Ela vai dar algumas respostas, ela não vai te dar as respostas precisas. Dentre essas respostas você pode procurar uma resposta, até você conseguir achar a resposta verdadeira.*

Pesquisador: *Você viu que a gente tem quatro explicações e você tem que escolher uma das quatro. Como é que você se sente com isso?*

EF6: *Acho que sempre tem que ficar buscando a verdade, entendeu? Se você não encontra, você tem que ir procurando, procurando, pesquisando. Acho que vai ter resposta. Sempre tem coisas novas no mundo.*

Pesquisador: *Você viu que a gente tem quatro explicações e você tem que escolher uma das quatro. Como é que você se sente com isso?*

EF7: *Bom! Achei que o curso foi interessante, como você estava explicando ontem... Não! Antes de ontem. Que não envolveu muita conta, a gente precisou trabalhar mais o cérebro, porque não estava aquela coisa bem explicadinha, que era só pegar a fórmula e sair resolvendo. Não. A gente teve que parar e pensar e achar a solução. Buscar respostas.*

(...)

EF7: *Fiquei mais interessada por saber que eu posso achar as perguntas que não vai ter só numa fórmula. Assim, eu mesma conseguir pensar, parar e pensar.*

Acreditamos, assim, que o hábito dos alunos em lidar com um tipo tradicional de operacionalidade pode, e precisa, ser mudado para que os temas de FMC sejam inseridos e compreendidos no Ensino Médio. Talvez seja necessário avaliar não “aquilo que o aluno deve saber daquilo que a ciência ainda não sabe”, mas como o aluno concebe e se posiciona diante daquilo que a ciência ainda não sabe. Devido a isso, elaboramos uma questão presente na última prova (p.66 do anexo) por eles realizada (aplicada duas semanas depois da apresentação da atividade do interferômetro) com uma operacionalidade diferente da tradicional, porém passível de ser avaliada. Após serem perguntados sobre como a ciência explica a natureza da luz, os alunos responderam a seguinte pergunta, transcrita abaixo, juntamente com algumas respostas por eles fornecidas:

4b - E você, que modelo você acha que melhor explica essa natureza?

P₃(4b)1: *Fico com a complementaridade, uma vez que deixa todo seu trajeto um mistério que não precisa ser desvendando, facilitando o trabalho.*

P₃(4b)2: *O modelo de complementaridade que não define exatamente o que é até o final do experimento, só depois de se obter um resultado perceberá qual melhor se encaixa.*

P₃(4b)3: *Eu fico com o modelo dualista realista que encara a luz como sendo os dois, onda e partícula dependendo da situação, como se as 2 andassem juntas mas em um certo ponto cada uma seguiria um caminho diferente, pois os outros modelos são menos consistentes.*

P₃(4b)4: *O modelo de complementaridade, pois é o único, que de certa forma, fica “em cima do muro”, só ao final do experimento é que se tem a certeza (mesmo que não tão certa).*

P₃(4b)5: O complementarista, pois todas as outras tem falhas em algum sentido, e essa, aparentemente não tem.

P₃(4b)6: Na minha opinião a luz pode ser realista dualista, pois se não se pode provar ao certo e estudos comprovam que a luz possui onda e outros também detectaram partículas, mas na verdade dizem que só pode ser um ao mesmo tempo.

Mas tenho o pensamento de que a luz antes de incidir em uma superfície metálica é onda, só se detecta as partículas quando a onda incide e os elétrons oscilam tanto que se transformam em onda que some oscilando por ai (obs: somente uma opinião)

P₃(4b)7: Acho que a 4ª teoria explica melhor, pois não é partícula e onda ao mesmo tempo e também não segue um caminho bem definido, o que leva à ver que seja uma onda.

P₃(4b)8: A que explica melhor é a teoria que diz que a luz é uma onda pois ela reflete e atravessa as coisas e ela é que explica melhor o que é a luz.

P₃(4b)9: O modelo dualista realista porque a luz não pode ser onda e partícula ao mesmo tempo ou a luz é só onda ou é só partícula.

P₃(4b)10: Da onda, por um lado, porque é sem massa, carrega energia, porém a partícula tem certo sentido quando se diz que tem trajetória definida e a onda não, eu acho que a luz é um pouco de cada.

P₃(4b)11: Onda. É onda porque um feixe de luz ilumina todo um lugar, porque a onda se espalha. E também não dá pra pegar uma onda eletromagnética, e uma partícula dá pra pegar.

P₃(4b)12: A da dualista-realista, porque naquele modelinho, podemos ver que a luz se divide (onda pra um lado, fóton para outro), e isso explica porque nunca acharam meio fóton.

P₃(4b)13: Onda, pois ela “carrega” a luz.

P₃(4b)14: O modelo da complementaridade, “é necessário experimentos para se ter respostas”.

P₃(4b)15: Na minha opinião luz são ondas pois elas sim não são possíveis de se ver, mas por outro lado também acho que a luz é uma partícula que se pode ver e ocupar um lugar no espaço, dizer que a luz são ondas eletromagnéticas é fácil, mas na sinceridade é muito difícil explicar sobre isto.

Pode-se, assim, perceber que os alunos foram capazes de construir bons argumentos em muitas respostas, muitos deles adequados às interpretações

apresentadas em Pessoa Jr. (2003). Ainda que seja complexo avaliar tais questões, por não serem constituídas de resposta tipo certo/errado, consideramos que esta forma de operacionalidade permite a confecção de um rico instrumento de análise do aprendizado dos alunos com relação aos temas de FMC.

Logo, havendo uma modificação na forma de operacionalização, é possível **transformar um saber em exercícios e problemas (Regra IV)**, fornecendo assim uma grande possibilidade da inserção e manutenção deste saber no currículo escolar.

Mesmo que muitos alunos tenham percebido a relevância em se discutir e, principalmente, refletir sobre as respostas fornecidas pela ciência, a ausência de um status momentâneo de verdade acerca da natureza da luz fez com que alguns estudantes ficassem em dúvida, gerando confusão, colocando em risco todo o processo. Como não há uma só resposta, surge um sério problema: o aluno pode passar a acreditar que qualquer tipo de resposta é, então, válido. O trecho abaixo ilustra este fato:

Pesquisador: *E como é que você... quando a luz ainda era onda... como é que você se sentiu, assim, com essa coisa de uma hora é onda, depois você chega não é onda mais?*

EF2: *Ah eu fiquei confusa. Vai ser assim... eu vou fazer o quê?*

EF2: *Eu fiquei no começo. Mas agora eu estou legal, já.*

EF2: *Agora eu entendi que a luz pode ser onda. Pode ser partícula. Pode ser... O que eu imaginava a luz pode ser (risos).*

Ainda que preocupante, vale ressaltar que este comportamento foi externado por apenas dois dos 32 alunos que freqüentavam regularmente as aulas.

Sendo assim, mesmo correndo um sério risco de não sobreviver no contexto escolar, optamos por apresentar as quatro interpretações, tomando os cuidados necessários para que não transparecesse a visão preferida pela professora. Percebemos que foi possível minimizar este risco, já que os alunos se portaram de maneira satisfatória em relação à abordagem que escolhemos. Este fato pode ser evidenciado por algumas respostas dos estudantes, transcritas abaixo, a uma questão contida em um exercício (p.67 do anexo) realizado cerca de duas semanas após a discussão do interferômetro:

3- A partir do que viu aqui, como você acha que é a natureza da luz? Qual das quatro interpretações mais te agrada? Por quê?

E₃(3)1: Para mim a luz não tem uma definição, mas, se for entre uma das quatro experiências escolho interpretação dualista realista, porque não pode ser onda pois a onda se divide mas o fóton não se divide, e não pode se espalhar. Mas a luz consegue se dividir por inteira. (mais uma coisa do capeta)

E₃(3)2: Achamos que a natureza da luz é incerta pois para saber se é onda ou partícula dependerá do que se busca, procura e defende . A quarta interpretação foi mais convincente pois nela vimos que a luz só pode percorrer a um caminho fazendo assim com que o observador só descubra o que é no final da experiência.

E₃(3)3: A interpretação da complementaridade é a que mais nos agrada, pois não há certezas sem experimentos.

Mesmo a luz possuindo características de onda e partícula, isso não quer dizer que ela é “Dualista-Realista”, pois a partir do momento que ela perde características de “um”, ela já não é mais este “um”. Logo, ou ela é onda, ou é partícula.

E₃(3)4: A natureza da luz é indecifrável até que se prove a verdadeira interpretação. A interpretação que mais nos agradou foi a 3. Dualista realista por que talvez ela seja a que mais se aproxima de uma conclusão correta sobre a luz. Ora os cientistas dizem que a luz é onda ora que é partícula, prefiro achar que as duas poderiam estar juntas, apesar de não estar provado.

E₃(3)5: Sinceramente acho tudo isso muito complicado, mas a interpretação que mais me agrada é a dualista realista, pois se nas diversas experiências ora ela “luz” se mostrava como onda, ora como partícula, é possível então acreditar que ela se composta de onda e partícula, e se mostra dependendo da situação.

E₃(3)6: Para mim nenhuma explicação é perfeita, mais a que mais me agradou foi a primeira que luz é onda e ela desaparece em determinadas situações.

E₃(3)7: Complementaridade, pois não conseguimos definir a sua natureza ou nada, pois antes disso não conseguimos definir e dar uma opinião e posição do que ela é. Precisamos ter primeiro o resultado de experiência (que sempre muda ao descobrirmos coisas novas) para dizer o que ela é.

Ainda que algumas respostas careçam de melhores argumentações, ao se levar em conta as condições dos alunos do Ensino Médio atual de nossas escolas é possível considerá-las satisfatórias.

Percebemos também que este marcador não parece totalmente privado da capacidade de **tornar um conceito mais compreensível (Regra V)**. Certamente que a atividade do Max-Gay tem essa capacidade, visto que insere o tema de maneira lúdica, escapando dos problemas decorrentes da linguagem científica necessária para a discussão da dualidade onda-partícula, mas não se pode desconsiderar que se trata apenas de uma metáfora, que fará a ponte somente com alguns elementos do alvo principal que é a interpretação do interferômetro. Por isso, ao passarmos para o estudo e discussão do experimento de Mach-Zehnder, não é possível fugir de seus termos científicos intrínsecos.

Porém, deve ser ressaltado que, mesmo não sendo possível dispensar os jargões e termos próprios do contexto do Saber Sábio, o tipo de abordagem e operacionalidade que optamos trabalhar permite criar condições para os alunos estabelecerem uma relação com a física bem diferente da habitual. Assim, por meio das respostas dos alunos, torna-se claro que eles se apropriaram de maneira bastante satisfatória de certos termos científicos, usando-os dentro dos contextos específicos de maneira adequada, como pode ser visto em várias das respostas acima transcritas. Nesse processo de síntese e de estruturação do seu conhecimento, que culmina na apresentação oral e/ou escrita de seu entendimento, as atividades mostraram fornecer suportes para que os alunos pudessem “falar sobre ciência” (LEMKE, 1997, 1982) rumo ao letramento científico (YORE, BISANZ e HAND, 2003).

Além disso, parece-nos que obtivemos êxito em revelar aos alunos uma outra face da Física, estabelecendo um tipo de relação mais prazerosa com o seu ensino. Transcrevemos abaixo trechos que apontam para a mudança da visão que estes alunos tinham sobre a Física:

Pesquisador: *Agora, me diz aí, o que você não gostou no curso?*

EF5: *Dizer assim que eu não gostei... não posso dizer um ponto negativo, um ponto certo, porque eu gostei. Eu gostei assim do lado que eu aprendi, porque eu nunca tinha visto Física de um jeito assim, entendeu? Eu via Física como se fosse Matemática. Aí é bom porque eu aprendi muito a ver a Física de outra maneira, ver coisas legais na Física, desenvolver minha curiosidade. Porque,*

tipo, acho que o mais importante para mim é desenvolver minha curiosidade para aprender.

Pesquisador: *Agora, me diz aí, o que você não gostou no curso?*

EF3: *Eu gostei. Eu não esperava isso de Física. Sinceramente, porque eu sou uma pessoa que odeia a parte de exatas, então, tipo, Química, Matemática, tudo que é relacionado com conta, com essas coisas eu odeio. Mas Física esse ano eu vi que era diferente. Assim por mais que eu não goste, eu gostei, eu gostei...*

Em nossa análise, também foi possível perceber alguns problemas referentes à **atualidade moral** deste marcador: ainda que possua uma **atualidade biológica**, sua **atualidade moral** não é percebida pelos alunos. Mesmo cientes de que muito da tecnologia atual faz uso dos conceitos quânticos, a discussão do tema está muito distante do contexto escolar, de maneira que os estudantes podem facilmente achar que o estudo deste marcador não é importante. Um exemplo disso aparece quando uma aluna é questionada sobre como explicar a natureza da luz:

Aluna: *Achamos que a luz não se explica, não precisamos ficar questionando de onde veio a luz, é muito óbvio:*

Deus disse: - Haja Luz. E houve luz. E Deus viu que a luz era boa.

Proponho, por que querer saber o que é a luz?

Não vai mudar nada na vida de ninguém...a luz vai continuar existindo do mesmo jeito e pronto.

Ainda que esta aluna tenha demonstrado, ao longo de todo o curso, uma atitude extremamente pragmática em relação ao conhecimento, sua fala pode revelar os problemas surgidos na inserção de um tema considerado por ela como moralmente desatualizado.

Notamos também que, a partir das discussões suscitadas com a apresentação do interferômetro de Mach-Zehnder, tem-se a possibilidade de fazer com que este marcador seja capaz de **articular o saber novo com o antigo (Regra III)**. Contudo, percebemos que uma articulação mais forte é possível apenas no Ensino Superior, visto que uma ligação conceitual mais profunda entre a dualidade e a interação da luz com a matéria parece se distanciar demais dos alunos do Ensino

Médio. Para que se possa articular os saberes envolvidos neste tema, de maneira que os estudantes possam compreendê-los profundamente, é necessário um domínio conceitual que vai além de um curso introdutório de Física Quântica de nível médio.

Quanto à atividade REAL x NÃO REAL, é possível fomentar discussões ligadas ao processo de fabricação das ciências, com seus métodos e critérios de validade. Neste sentido, ainda que não seja um conteúdo de Física, temos a chance de estabelecer nos alunos a noção de que as ciências, em especial a Física, é muito mais do que os objetos que ela cria. Desta forma, ao abrirmos um debate acerca do realismo científico, tem-se uma oportunidade única de **modernizar o saber (Regra I)**, discutindo a dimensão epistemológica do conhecimento, algo que nunca é abordado no Ensino Médio.

De acordo com a Transposição Didática, podemos compreender o porquê deste tipo de discussão não estar presente nas escolas. Ao analisarmos a **operacionalidade** envolvida no tema desta discussão, é fácil perceber a imensa dificuldade de elaboração de exercícios e questões avaliáveis. Neste caso, há uma grande ruptura do Contrato Didático. O vínculo entre a filosofia e a ciência é simplesmente desconhecido pelos alunos, gerando um sentimento de confusão e descrédito. Os alunos reagem como se não fosse possível uma discussão como a que fizemos em uma aula de Física:

Pesquisador: *E de ter uma discussão assim numa aula de Física. O que você achou disso?*

EF3: *Foi parecido com Filosofia. Não tem certo e errado. Você tem que saber explicar sua opinião.*

EF3: *Só pensei em ultimo lugar Física não teria isso. Mas já que teve... o que a gente fez foi incomum mesmo.*

Pesquisador: *E de ter uma discussão assim numa aula de Física. O que você achou disso?*

EF7: *Bom! Eu achei um pouco perdida, de não saber... aquela coisa o que é luz? É onda ou partícula? Uma hora você achar que é uma coisa, só que depois você começar pensar direito não é aquilo que você pensava, já era outra coisa que você pensa de novo que não é mais aquilo. É tipo assim como*

um círculo, uma espiral. Vai crescendo, crescendo, crescendo. Assim, é bem interessante.

EF7: *Mas eu achei legal, porque eu aprendi. Eu odiava filosofia, eu odeio pensar, preferia... prefiro até hoje as coisas que envolvem mais razão. Só que eu vi que pensando a gente consegue, sei lá, trabalhar melhor. Torna até mais gostoso.*

Com isso, torna-se ainda mais complicado o tratamento de um tema intrinsecamente complexo. No intuito de enfrentar esse desafio, elaboramos uma pergunta (p.67 do anexo) que deveria ser respondida pelos alunos após a discussão da atividade, e que agora transcrevemos abaixo juntamente com algumas respostas fornecidas pelos alunos:

De acordo com a interpretação da complementaridade, pode-se pensar o seguinte: “Se um átomo existe somente quando olhamos para ele, o meu corpo é feito de átomo, será que meu pé existe quando não estou olhando para ele?”

E₄1: *É claro que sim. Não é porque eu não vejo algo que aquilo não existe. Se fosse assim ninguém existiria, fecharíamos os olhos e ficaríamos invisíveis. Ex: Eu não vejo Deus, mas sei que ele existe.*

E₄2: *De acordo com a complementaridade : só determinamos algo ao final do experimento, ou ainda, não determinamos o “espaço” intermediário..., logo, meu pé existe quando não estou olhando p. ele, por que ao final da experiência o verei, e assim, no “espaço” intermediário em que eu não estava o olhando ele existia.*

E₄3: *Partindo da idéia de interpretação da complementaridade, só podemos identificar “algo” após o término do experimento, porém não podemos ver o átomo, mas sabemos que somos formados milhares deles assim não precisamos necessariamente olhar para o pé para que ele exista.*

E₄4: *Meu pé não existe quando não estou olhando para ele pois se um átomo só existe quando olho para ele, então todas as coisas, inclusive o meu pé só irão existir quando eu os estiver olhando.*

E₄5: *Mas é claro que sim! O fato de estarmos olhando do nosso pé ou não, não interfere em sua existência. Eu posso não estar olhando meu pé, enquanto caminho, mas ele está lá, me conduzindo à determinado lugar.*

E₄6: Existem varias coisas que existem mas que eu não vejo como por exemplo o vento, as ondas de rádio, eu não as vejo, porém sei que elas estão ali.

E₄7: Nem sempre o que não se pode ver não existe. Por que os átomos tb não os podemos ver e sabemos de sua importância e existência.

E₄8: Sim, existe. Pois se no seu “passado” se constatou que seu pé estava lá, logo o pé continuará lá, de olho fechado ou não.

E₄9: Se nós, teoricamente só podemos saber do passado analisando o presente, posso dizer que meu pé sempre esteve lá, sabendo que, eu vi meu pé antes, e ao olhar de novo ele continua lá, sendo assim meu pé existe sim, mesmo que eu não olhe para ele pó!!!

Poucos alunos sentiram-se confortáveis em responder a esta pergunta. A maioria deles considerou-a sem sentido, desnecessária, mesmo achando instigante buscar uma resposta. Não podemos dimensionar se isso é decorrente da falta de hábito de se trabalhar no Ensino Médio este tipo de questão ou se a complexidade da questão conduz o aluno a esse sentimento.

Entretanto, após assistirem ao filme “The Matrix”, foi possível elaborar uma rica discussão sobre a realidade, o realismo científico e a validade da ciência. Percebemos em muitos alunos um grande interesse em debater e refletir sobre a questão, visto que a discussão foi intensa, com posicionamentos espontâneos por parte destes alunos, que defenderam todo o tempo suas opiniões. Notamos, por exemplo, que alguns alunos estabeleceram conexões espontâneas entre trechos do filme e a fabricação da ciência.

No início do filme, Neo, o protagonista, é impelido a procurar uma pessoa (Morpheus), pois ele se via sempre perturbado pela pergunta: “What is the matrix?”. Uma personagem coadjuvante, Trinity, o convence a sair de casa com a seguinte fala: “é a pergunta que te move”. Um dos alunos, durante a discussão argumenta o seguinte:

A1: (...) Tem muitos pontos, que nem na física, você tem que procurar achar uma existência (...) ele [Neo] ia em busca das resposta que ele não tinha entendeu? Ele não queria acreditar e é mais ou menos o que acontece aqui, a gente não pode acreditar em uma coisa e não buscar em outros lugares.

Um outro momento interessante da discussão diz respeito à capacidade de a ciência construir explicação sobre o mundo. Após discutirem sobre os objetos da ciência, e a incapacidade da Física em determinar o que realmente é a luz, um dos alunos fala:

A2: É... mas eu acho que o legal é você buscar a resposta, você chegar ao mais próximo (...) só que quanto mais se aproxima mais distante fica, você vai chegando nas respostas, mas não A resposta! A resposta que estiver mais legal você aceita (...) aí você fala assim: nossa! Mas eu nem sabia que era assim.

Outro aluno, contudo, tem um sentimento bastante diferente:

A3: É super desconfortável você não achar a resposta, você buscar, buscar, achar outro tipo de resposta mas nunca chega a que você quer. Sei lá é a dor, tá ligado? É uma coisa que sente. Tô com uma puta dor de cabeça! Mas o porque que acontece isso?

Acreditamos que muitos alunos foram capazes de estabelecer conexões satisfatórias em um tipo de discussão nada trivial, geralmente impraticável com o público não especializado. Como a escola é o ambiente mais provável (talvez, infelizmente, o único) que este tipo de discussão ocorre, estas conexões podem até mesmo ser consideradas como sofisticadas, visto que este tipo de abordagem encontra-se totalmente distante do que sempre lhes foi imposto e cobrado em sala de aula.

Curiosamente, antes mesmo de exibirmos (e sequer mencionarmos que isso seria feito) o filme “The Matrix” uma aluna fundamentou sua resposta a uma questão⁴⁸ contida no questionário final conectando as discussões ocorridas em sala de aula com elementos trazidos de fora do ambiente escolar:

Q(13)12: Eu ficava confusa. Minha cabeça até doía, me dava dor de cabeça pensar nisso, pois eu não conseguia chegar a uma conclusão. Aí eu lembrei de um pedaço do filme Matrix... em específico é a cena que o Neo pergunta a Morpheu: “ – Porque meus olhos doem?” e ele responde: “ Por que você nunca os usou.” Ou seja, eu sentia essa dor

⁴⁸ A questão era a seguinte: Vimos que para a pergunta: “o que é a luz?”, não há uma única forma de resposta. Isso é muito diferente do que está acostumado? Como você se sentiu sem ter uma resposta única para dar?

*por que nunca usei meu cérebro dessa maneira numa aula de física.
Sempre tudo era “mastigado” e dessa vez não foi, tive que pensar.*

Certamente que discussões de cunho filosófico necessitam de um estudo profundo, disponibilidade de tempo e dedicação, mas consideramos, dentro das limitações dos alunos e de nossa escola pública, que este marcador é capaz de gerar discussões epistemológicas e filosóficas imprescindíveis para a compreensão dos fundamentos da Física Quântica de uma maneira muito mais profunda e significativa que a mera transmissão de informações. Ao fazer com que estes estudantes se deparem com questões acerca da realidade, um educador pode aproveitar a chance, talvez única, de fazê-los abandonar o realismo ingênuo e a visão deformada e dogmática da ciência. Há, entretanto, uma linha tênue, representada pela forma como este marcador é desenvolvido em sala de aula, que separa seu sucesso e sua sobrevivência de seu total fracasso e, conseqüentemente, seu desaparecimento do currículo escolar.

Considerações Finais

Em nosso trabalho tivemos uma maior preocupação em construir objetos de ensino que viabilizassem a transposição de conceitos de Física Moderna e Contemporânea para o Ensino Médio. Esse foco de nossa pesquisa foi determinado a partir da crença de que nos objetos (atividades, textos, exercícios, roteiros etc.) residem o maior impedimento para a efetiva inserção desses conteúdos em sala de aula. Por meio de nossa análise foi possível delinear algumas respostas sobre “como” inserir elementos de Mecânica Quântica na escola secundária, mas também novas questões a serem respondidas.

A Transposição Didática, enquanto sistema teórico, é um instrumento que permite analisar os saberes presentes nas escolas. Quando aplicada aos conteúdos já cristalizados permite entender porque temas dos séculos XVII, XVIII e XIX figuram abundantemente nos currículos atuais. Esta permanência decorre do fato desses saberes terem sido fruto de transposições bem sucedidas para o ambiente escolar. Temos, assim, uma estrutura curricular que tende a se manter, apesar da defasagem que hoje ultrapassa trezentos anos.

Nossa análise permite melhor entender porque as inovações curriculares são raras, indicando motivos que justificam o fato de a FMC ainda estar pouco presente nas escolas: ainda não tenhamos encontrado “caminhos” para uma transposição didática que “deu certo”. Com isso, os conteúdos de FMC continuam nos livros universitários, nas propostas curriculares (PCNs), porém não estão presentes nas salas de aula. Por outro lado, conteúdos clássicos como a Cinemática, o plano inclinado, o pêndulo eletrostático, associação de resistores e outros, mantêm-se há tanto tempo na escola média, apesar de muitas vezes serem pouco significativos para os alunos. Estes conteúdos deram certo no sentido de que estão adaptados às características e necessidades do Sistema de Ensino.

Os conteúdos de Física Quântica analisados a partir dos critérios estabelecidos por Chevallard, parecem cumprir alguns deles, mas não satisfazem, de maneira estrita, outros, talvez os mais relevantes para sua inserção no Ensino Médio. Sobre esses critérios, podemos dizer, inicialmente, que não há dúvida de que a Teoria Quântica seja consensual no seio da comunidade científica. Por outro lado, há um debate ainda não concluído sobre a melhor forma de interpretar o que ocorre no mundo microscópico. Mantendo-se a seleção de conteúdos restrita aos aspectos puramente matemáticos da Teoria Quântica, não há motivos para não considerá-la consensual. Podemos questionar, como faremos mais abaixo, a pertinência ou não de

manter esta discussão longe da sala de aula, restringindo o Saber a Ensinar apenas ao formalismo dessa teoria.

Em relação aos demais critérios, é indiscutível que a Mecânica Quântica possui uma **atualidade biológica** (é a teoria que melhor representa a gama de dados empíricos obtidos nas pesquisas) e, certamente, tem **atualidade moral** (está na base de todo o progresso científico-tecnológico presente na sociedade moderna). O maior problema para sua transposição didática parece surgir de sua baixa operacionalidade em termos de produção de atividades para os estudantes. Quando comparada aos conteúdos clássicos, os conteúdos modernos parecem inadequados para a confecção de exercícios, problemas, experimentos adaptados ao Sistema de Ensino Básico. Por um lado, esse problema está ligado à **criatividade didática**, e por outro lado, à **terapêutica**, ambas ainda por serem construídas, pois as experiências com a introdução de conteúdos da teoria quântica no sistema de ensino ainda são recentes.

Em termos das regras propostas por Astolfi, duas delas estão a desafiar a criatividade dos físicos-educadores:

i) Regra IV (Transformar um saber em exercícios e problemas):

Na tentativa de manter o rigor, a tendência é introduzir os tópicos de FMC por meio de propostas mais alinhadas com as exigências conceituais do Saber Sábio e, portanto, mais próximas dos Saberes a Ensinar presentes nos cursos universitários básicos. O problema nessa tendência é que tais propostas excluem boa parte dos professores de Física e a maioria dos estudantes do Ensino Médio. Seja por falta de domínio conceitual ou do formalismo matemático, o Saber a Ensinar fica restrito a poucos professores que, por sua formação privilegiada em Física, são capazes de ensiná-los no Ensino Médio. A possibilidade de aprendizagem dos estudantes é ainda uma questão de pesquisa em aberto. Tudo isso sem considerar o problema da falta de significado, torna esse caminho pouco indicado.

Outras propostas, mais próximas das exigências do sistema didático, podem ser elaboradas tomando por inspiração o que vem sendo feito nas aulas de Física Clássica do Ensino Médio. Nesse tipo de orientação, a busca por produzir exercícios e problemas pode induzir à utilização da mesma estrutura de transposição que criou a Cinemática e a Dinâmica escolares. Ela conduz à criação de exercícios similares àqueles desenvolvidos em boa parte dos livros didáticos tradicionais, os quais vêm sendo criticados ao longo das últimas décadas pelos educadores em geral. Isso

implicaria apenas mudar o nome dos elementos envolvidos nos exercícios⁴⁹. Assim, um exercício comum que aparece quando se intenciona inserir Física de Partículas nas escolas é, simplesmente, transformá-la em colisões de bolinhas e exigir o cálculo de quantidade de movimento para descrever seu comportamento. Estas bolinhas, agora com nomes excêntricos como elétrons, prótons, nêutrons etc. são na verdade as mesmas bolas de sinuca que antes colidiam numa mesa de bilhar. Ou seja, criar exercícios que trabalhem conceitos de FMC utilizando o mesmo “molde”, ou a mesma operacionalidade existente na Física Clássica é “vender vinho velho em garrafa nova”. Assim, apenas troca-se relação $F = ma$ por $\varepsilon = h\nu$.

Procedendo desta maneira, corre-se o risco de transformar a FMC em algo tão cansativo, inexpressivo e enfadonho quanto é o ensino da Cinemática em muitos casos. Isso justamente por esta ser trabalhada apenas com exercícios de “formulismo”, onde a cada momento, se troca uma das variáveis, criando inúmeras variações diferentes, porém sem significado para os alunos.

Mas, não se deve imaginar que exercícios deste tipo não tenham nenhum valor, nem que devam estar fora de cursos introdutórios de FMC. A operacionalidade não deve se restringir ao trabalho do professor, pois é por meio dela que os alunos se percebem como participantes do processo de ensino-aprendizagem. Daí a necessidade de produção de textos e atividades adaptadas ao sistema didático, revelando a importância dessa regra para a Transposição Didática. Mas é preciso construir atividades intermediárias, com uma operacionalidade próxima das tradicionais, para gerenciar o dia-a-dia na sala de aula e para não haver ruptura com o Contrato Didático já estabelecido. Logo, os exercícios tradicionais, com cálculos numéricos, não são apenas formalidades. Estas atividades são importantes no processo educacional. No entanto,

Transformar a experiência educativa em puro treinamento técnico é amesquinhar o que há de fundamentalmente humano no exercício educativo: o seu caráter formador. (FREIRE, p.37, 2000).

Assim, seu valor deve ser cuidadosamente atrelado ao que seria possível obter em termos de entendimento do mundo microscópico através destes exercícios. Isto é, as atividades a serem criadas devem cumprir as necessidades “operacionais”, mas, principalmente, abarcar o novo contexto epistemológico definido pelos conhecimentos

49 Por exemplo, ver exercícios: 9, p.297; 13, p.298; 9, p. 320; 1, p. 359; 3, p.365; 11 e 12, p. 382; GASPAR, 2000.

da FMC, constituindo assim um tipo de operacionalização diferente do que temos agora nos cursos clássicos.

A idéia de que um saber deve propiciar a criação de tarefas e atividades possíveis de serem conceituadas de forma objetiva nos conduz a uma questão importante acerca da adequação desta regra a determinados tipos de saber: Será que no Ensino Médio o tipo de abordagem que adotamos, visando uma compreensão conceitual mais profunda de elementos estruturados em um complexo formalismo matemático, é capaz de fornecer condições para a confecção de atividades com este tipo de operacionalidade?

Nossa atividade sobre modelagem, por exemplo, fornece um bom exemplo para a construção respostas a essa pergunta. Antes do manuseio da “caixa preta” os alunos já começam a criar hipóteses. A Regra IV (Transformar um saber em exercícios e problemas) não contempla esse tipo de atividade justamente por causa do tipo de operacionalidade requerida, que foge do padrão objetivo de resposta. Entretanto, tal atividade permite a criação de hipóteses pelos alunos, algo imprescindível para as Ciências e, principalmente, para o ideal de um curso formativo. Assim, a ênfase é maior no aspecto processual do conteúdo. Isso sugere um abandono da forma cristalizada na Regra IV da Transposição Didática, que prioriza o conteúdo, usualmente o único aspecto do conhecimento valorizado no ensino tradicional. A operacionalidade tradicional corrobora e conduz a uma visão dogmática da ciência quando dela mantém seus produtos e exclui seus processos.

Assim, em relação à produção de atividades, pode parecer que um saber que sobrevive no Ensino Médio é aquele que pode transformar-se em uma série de exercícios semelhantes e enfadonhos que constarão nas apostilas dos cursos pré-vestibulares. Essa idéia é, no entanto, equivocada. Segundo a Transposição Didática, a operacionalidade deve ser vista em conexão estrita com os processos de desenvolvimento das atividades e de sua avaliação. As atividades devem ser pensadas de forma que professor e aluno sejam capazes de ter consenso sobre o que fazer e como avaliar o resultado das atividades propostas. Quando a realização e a avaliação de atividades parecerem “naturais” para ambos, configura-se uma situação de pertinência da atividade para com as exigências didático-pedagógicas da sala de aula.

ii) Regra V (Tornar um conceito mais compreensível):

A tarefa de gerar compreensão dos conceitos e leis associados à Teoria Quântica é das mais difíceis. Por um lado, boa parte do entendimento desta teoria está relacionada ao domínio de uma linguagem matemática muito sofisticada. As equações de onda, números imaginários, funções de probabilidade, matizes etc. não são dominadas amplamente pelos estudantes do Ensino Médio. Por outro lado, a incerteza e a interpretação probabilística são recursos imprescindíveis para representar o mundo microscópico e nem sempre são conceitos fáceis de serem utilizados pelos mesmos estudantes.

A linguagem desempenha um papel determinante nesse caso, frente a necessidade de se transpor o saber de uma forma que seja acessível ao nível de compreensão dos alunos, fugindo de termos técnicos e da linguagem científica. Este é um grande desafio a ser enfrentado quando se deseja inserir as teorias modernas na sala de aula.

Além disso, esta regra conduz a um outro grande desafio a ser enfrentado pelos pesquisadores em Ensino de Física: a necessidade de “driblar” o formalismo matemático intrínseco à Mecânica Quântica. Esta necessidade dá origem a dois grandes problemas. Primeiro, pode parecer que o fato de se ter que adequar o instrumental matemático sofisticado das teorias modernas implica que a Física prescindia da matemática. Nossa frustração em não utilizar a matemática da maneira que desejávamos só foi superada pela consciência de que os conhecimentos matemáticos dos alunos da escola brasileira de hoje não são suficientes para discussões mais profundas sobre os elementos da Mecânica Quântica. Entretanto, isso não significa que não tenhamos tentado inseri-la. O segundo problema é a dificuldade (talvez mesmo impossibilidade) de se utilizar palavras para expressar partes da Teoria Quântica que só a linguagem matemática é capaz. A “tradução” é perigosa pois com as palavras perde-se a precisão conceitual que a matemática fornece. Até mesmo a avaliação torna-se complexa, sendo necessário despender muito tempo para que as respostas fornecidas pelos alunos possam ser avaliadas.

A Regra V também indica a necessidade de se construir atividades que possam desenvolver a imaginação e a abstração necessárias para se vislumbrar as peculiaridades do mundo quântico. Ainda que não tenha sido alvo de nossa pesquisa, foi possível perceber, em conversas informais após suas realizações, que atividades como a da caixa preta, Max-Gay e Real X Não Real são eficientes para se trabalhar

esse tipo de abstração, pois exigem outra forma de pensar, diferente do que estão acostumados, levando-os a imaginar coisas que antes sequer imaginavam.

Faltam pesquisas que indiquem caminhos para a produção de atividades que trabalhem formas mais elaboradas de abstração. Talvez, para que a inserção da FMC torne-se efetiva, este tipo de atividade deva acompanhar os temas (geralmente muito abstratos) transpostos para a sala de aula, tendo em vista que “*o concreto é o abstrato que se tornou familiar pelo uso*” (LANGEVIN apud PATY, p.277, 1995).

Assim, estas regras fornecem grandes pontos de reflexão para que a inserção destes temas em sala de aula se torne realidade. A dificuldade encontrada pelos alunos na realização de algumas atividades que elaboramos talvez seja fruto da inadequação ao tipo de operacionalidade que estão acostumados, tributário de uma forma de ensino já cristalizada, centrada nos saberes da Física Clássica, onde há a preferência por atividades prontas e fechadas, quase sempre de resposta única. Os alunos estão acostumados com uma visão de ciência “exata” e, portanto, imutável e com uma única verdade/resposta para os fenômenos. Eles parecem estar acostumados com um conhecimento consensual, pronto sem falhas, fruto da visão distorcida de ciência a eles imposta.

Nossa análise indica que, se se deseja apresentar conceitos de FMC de forma que vise uma aprendizagem efetiva, que não seja meramente uma transmissão de informações, há de se requerer uma outra forma de operacionalidade. Ao se adequar a Regra IV, é possível que saberes mais vinculados à filosofia da ciência e à epistemologia possam vir a ser saberes “ensináveis”, fornecendo alternativas de inserção de temas modernos no Ensino Médio. Ressaltamos aqui, por exemplo, trabalhar com a evolução dos conceitos da Física, algo que não fez parte da construção do curso aqui apresentado. Com isso é possível mostrar que ao longo da história dessa ciência muitas idéias que, eram tidas como as melhores para determinados momentos, foram refutadas ou reformuladas para se chegar até às idéias atuais.

Este tipo de operacionalidade permite a criação de discussões pertinentes ao ensino, pois revelam o caráter provisório das verdades e construções científicas, colocando em discussão a posição que ela ocupa no mundo moderno. Pode-se, assim, questionar a crença perigosa de que a ciência é soberana, dona de todas as respostas sobre o conhecimento. Esta crença transformou a frase “cientificamente comprovado” em caráter de lei, permitindo acabar com qualquer dúvida e quaisquer

questionamentos. Com isso, é necessário somente a sua presença para que as pessoas acreditem que o que ela atesta é verdadeiro, incontestável. As inúmeras propagandas com cientistas confirmando a “seriedade” e “qualidade” de diversos produtos, de saponáceos a secadores de cabelos que acabam com a eletricidade estática são exemplos disso. Assim, mesmo sem compreender o que é a ciência, as pessoas se agarram a ela como tábua da salvação. Cabe ao Ensino de Ciências desmistificar a natureza da ciência.

Contudo, é necessário nesse processo um imenso cuidado. A maneira com que esses saberes foram inseridos não foi trivial, indo muito além do conteúdo, que já é intrinsecamente complexo. Entramos em um plano mais amplo, mais perigoso, pois nossa abordagem pode gerar sérios erros epistemológicos.

O processo de construção da ciência, bem como sua validação, devem ser tratados na dosagem correta. Percebemos que o fato dos estudantes saberem que a ciência não sabe nem compreende um pouco daquilo que ela estuda, pode levá-los a acreditar que nada deve ser compreendido, que a ciência nada sabe ou que qualquer conhecimento é equivalente, conduzindo a um relativismo extremamente prejudicial. Certamente que conceitos da FC não estão livres desses problemas, podendo gerar erros conceituais e epistemológicos talvez até maiores. Contudo, os saberes envolvidos no ensino da FQ parecem mais fortemente susceptíveis a essa leitura relativista, uma vez que se ligam facilmente a questões problemáticas.

Isso reflete outro problema a ser enfrentado pela comunidade de Ensino de Ciências: a necessidade de professores muito bem formados, que precisam conhecer e dominar muito mais que o conteúdo. A natureza e utilização de modelos na ciência, por exemplo, é um tema raramente tratado na graduação, de forma que um professor mal preparado pode facilmente cometer erros, considerando, por exemplo, que o modelo é uma cópia exata do pedaço da realidade que ele representa.

Da mesma forma, a preocupação extrema dos cursos de graduação no aspecto matemático da Mecânica Quântica alija os futuros professores de trabalhar com as suas diferentes interpretações. Isso revela que o ensino da Teoria Quântica é tão complexo quanto o seu próprio formalismo, exigindo uma formação diferenciada para a utilização dessa abordagem na sala de aula.

Desta forma, transpor a Teoria Quântica para a sala de aula do Ensino Médio deve ser vista como uma tarefa das mais complexas, pois de um lado têm-se as exigências epistemológicas inerentes ao campo de conhecimento produzido pela

Física Moderna, muito distantes dos padrões de entendimento forjados no mundo cotidiano. Por outro lado, as exigências do domínio escolar não são menores, pois ideologia, necessidades de natureza didática e tradição se entrelaçam na constituição de um domínio particular. Tem-se de fato um problema complexo e com solução não óbvia: como satisfazer a ambos domínios? Será possível manter o rigor conceitual e ao mesmo tempo satisfazer as exigências do sistema didático?

Entre manter o rigor necessário para o ensino de Mecânica Quântica e satisfazer as necessidades do ambiente escolar, parece-nos possível a construção de uma posição alternativa, por meio de uma transposição didática centrada em atividades que tenham uma maior ênfase nas características mais conceituais do conhecimento, e que também privilegiem o debate e argumentação de cunho filosófico. Essa perspectiva parece capaz de contornar os obstáculos gerados pelas representações probabilísticas e pelo formalismo matemático, inerentes a essa nova teoria. No entanto, tais atividades encontram resistência no ensino tradicional. Como afirma Alves-Filho:

De fato, observa-se que os objetos de ensino que permitem a elaboração de exercícios e problemas são mais valorizados no espaço escolar, em detrimento daqueles que ficam restritos à argumentação teórica. (ALVES-FILHO, 2000, p.238)

De alguma forma, os professores de Física, os autores de livros didáticos, os formuladores de programas curriculares, os dirigentes escolares, os pais de alunos e os próprios alunos, ou seja a Noosfera, devem ser capazes de se libertar das regras de sobrevivência que geraram o Saber Escolar tradicional. Ao buscar uma nova “rota” para a transposição didática, estaremos abertos ao estabelecimento de novas “regras” nas quais possa se vislumbrar a acomodação entre os requisitos da ciência com aqueles da sala de aula. Esse novo Saber Escolar deve ser avaliado em termos da motivação que ele gera e de seu sucesso entre os alunos. Porém agora o sucesso deve também ser visto no sentido de entendimento, prazer e significação e não apenas em termos de adaptabilidade.

Com relação ao entendimento, o corte com a realidade imediata é profundo, de modo que, ao se tratar estas teorias de maneira mais formativa, esta ruptura pode ter sérias implicações para o ensino. Com isso, acreditamos na necessidade de se tratar o ensino da FMC a partir de um ponto de vista calcado no realismo crítico. Esta defesa pelo realismo científico é embasada por motivos filosóficos, bem como parte de nossa crença na necessidade de um posicionamento epistemológico durante o ato de

ensinar. Entretanto, faltam pesquisas que corroborem a necessidade de se adotar tal postura no Ensino de Ciências.

Concluimos também que a FM pressupõe fazer com que os próprios alunos revejam suas concepções sobre o que vem a ser ensinar, e como ensinar. Os recorrentes questionamentos para a professora, no sentido de obter a resposta correta, a resposta que ela gostaria de ouvir, evidenciam a forma com que percebem o ensino. A insatisfação originada pela ausência de resposta única, bem como a reclamação de a professora cobrar algo que ela também “não sabe” revelam a concepção de um ensino centrado na transmissão, em que a professora desempenha o papel de detentora da verdade da ciência.

Percebemos com isso, que se pode ficar entre dois extremos: da maneira como fizemos, abrindo o debate sobre a construção científica, tem-se a possibilidade de que a ciência seja colocada em dúvida. A outra forma, que nos livra desse problema, é ser dogmático.

Contudo, ensinar implica, necessariamente, um processo onde é preciso correr riscos. Essa condição é inevitável. A Transposição Didática auxilia a construção de estratégias que possibilitem administrar estes riscos ao mostrar que o saber precisa ser transposto, que ele precisa ser modificado e que não há forma de manter a pureza original. Logo, deve-se tentar otimizar o máximo possível esta transposição.

Até agora, o ensino da Física era jogado na vala do dogmatismo e, por uma série de pesquisas, sabe-se que isso não vem funcionando bem. Outrossim, ao apresentarmos as várias interpretações da Mecânica Quântica abrimos margem para o relativismo, como alguns alunos externaram. Como não existe uma interpretação única, será que não se pode imaginar uma interpretação religiosa melhor para a luz? Esse risco é inevitável, e precisa ser enfrentado. Entrar na dimensão do processo parece ser fundamental para que o ensino de FMC não seja apenas informativo.

A transposição, já cristalizada, dos temas da Física Clássica passa a falsa impressão que o processo foi dispensado, não sendo relevante para transpor os produtos. Há, entretanto, uma forte visão empiricista, positivista, que esconde o processo, como se ele não existisse.

Para se trabalhar de maneira formativa a FMC no Ensino Médio o caminho que parece se vislumbrar é aquele onde a questão do processo deve ser tratada, juntamente com o produto juntos.

Com isso, a Mecânica Quântica, em particular, abre margem para as mais diversas especulações, de modo que o professor precisa estar ciente que isso irá acontecer. Daí a necessidade de uma negociação entre o conhecimento e objetivos educacionais. Qual visão de ciência deseja-se passar para os alunos? Quais vínculos se quer que eles estabeleçam com o conhecimento? Qual a melhor forma de obter resultados?

Nossa posição tende a privilegiar uma visão realista, porém crítica. Achamos que é necessário apresentar aos alunos as fronteiras existentes entre aquilo que ele pode ou não considerar. Isto é, ele pode sempre ficar em dúvida entre as quatro interpretações da Mecânica Quântica que apresentamos, mas isso não implica que ele pode criar a sua própria interpretação.

Pode-se, assim, analisar o que leva uma interpretação a ser mais aceita do que outra e quais os problemas mais complicados de se resolver quando se adota cada uma delas. Pode-se, também discutir, por exemplo, o papel da experimentação na ciência na determinação da rejeição ou apoio às diferentes interpretações. Ou seja, aprender a julgar e valorizar pode ser uma tarefa importante de ser aqui explorada. Um bom professor preparado pode transformar esse risco em um exercício de formação de opinião, de argumentação, embasado nos resultados obtidos ao se discutir a fundo a fabricação da ciência.

Desta forma, os alunos descobriram que não existe uma resposta única, exata, para muitas das perguntas feitas pela Ciência. Ainda que desgostosos com isso, perceberam que formular as perguntas certas é essencial para a busca da resposta. Mesmo sem uma resposta única eles podiam obter respostas muito satisfatórias. Embora sem perceber, estes alunos estavam discutindo o fazer científico.

É preciso ressaltar que nossa pesquisa não focou a aprendizagem dos conceitos transpostos para a sala de aula devido ao recorte necessário para a realização do mestrado. Somos, assim, conscientes de que esse aspecto fundamental do ato de ensinar careceu de resultados. Ainda assim, percebemos que dois grandes problemas precisam ser enfrentados em relação ao ensino de temas modernos: o uso de analogias e modelos clássicos ou semi-clássicos; e a forma de avaliação de tais temas.

É imprescindível que sejam feitas pesquisas que possam deixar mais claro o papel das analogias e dos modelos no processo de ensino-aprendizagem de conceitos da Mecânica Quântica. Sem resultados determinantes, não se tem uma base sólida,

consensual, de maneira que a decisão de se utilizar estes meios é definida, na maioria das vezes, por uma escolha pessoal. Neste caso, a Transposição Didática pode ser fundamental. Por explicitar as características relevantes para a permanência de um saber na sala de aula, ela pode orientar, de um modo menos subjetivo, a decisão de se adotar ou não tais recursos.

Quanto ao processo de avaliação, pesquisas relacionadas ao ensino de FMC são ainda mais raras. Como avaliar temas modernos, que exigem metodologias diferenciadas, com instrumentos calcados no ensino da Física Clássica? Para nós foi uma tarefa extremamente difícil. A complexidade do conteúdo, a maneira com que foi apresentado, a nova operacionalidade que utilizamos, a relação do aluno com o conhecimento, sua visão da ciência e do ensino de ciência, todos esses fatores encontram-se imbricados, tornando-se indissociáveis do processo de avaliação. Assim, é preciso que se discuta profundamente o desenvolvimento de formas e instrumentos de avaliação mais adaptados, mais adequados aos saberes da Física Moderna.

Mesmo se tratando de uma experiência pontual, podemos dizer que o curso que elaboramos passou pela **terapêutica**, fornecendo indícios de que o curso “deu certo” nos termos propostos pela Transposição Didática. Uma boa evidência desse “sucesso” pode ser ilustrado pelo comportamento da turma na qual aplicamos o curso, que era, frequentemente, considerada apática por outros professores. Tal julgamento levou-os inicialmente a desestimular nossa proposta de aulas mais participativas. Contudo, o comportamento dos alunos era o extremo oposto. As discussões e debates eram intensos, com um excelente grau de participação dos alunos, de modo que nos conselhos de classe os outros professores sempre queriam saber o que estava sendo feito com esses alunos para que seu comportamento diferisse tanto daquele apresentado em suas disciplinas.

O comprometimento destes estudantes com o curso pode ser exemplificado por um fato extremamente raro no ambiente escolar atual: devido a uma série de problemas com o calendário letivo, o filme *The Matrix* só pôde ser passado uma semana após a entrega das notas. A aposta de todos aqueles que vivem o dia-a-dia do Ensino Médio era de que não seria possível a exibição deste filme pois os alunos simplesmente não iriam ao colégio depois de terem suas notas. Mesmo sem saber qual seria o filme, apenas dois dos alunos se ausentaram.

A partir de nossa análise foi possível concluir que os marcadores por nós escolhidos possuem características essenciais para sua transposição e manutenção no ambiente escolar. Concluímos também a necessidade de se adequar a Regra IV quando se trata da transposição de temas de FMC, sendo indispensável buscar outra forma de operacionalidade que não a tradicionalmente realizada. Assim, nossos marcadores também indicam caminhos e possibilidades de inserção da Mecânica Quântica no Ensino Médio.

Talvez a maior contribuição de nosso trabalho tenha sido evidenciar a necessidade de se romper com o que nos parece estabelecido e sem possibilidade de mudança. É necessário que se questione a maneira “natural” pela qual a Física é apresentada se se deseja inserir temas de FMC no Ensino Médio. É necessário transpor a dimensão epistemológica do conhecimento físico. Assim pode-se pensar em como as práticas educacionais e estratégias de ensino podem ser construídas para que esses temas sejam transpostos para a sala de aula.

A Transposição Didática não deve ser vista como uma norma de conduta. Ela não diz o que deve ser feito, ainda mais por que esse processo de produção de saberes escolares é anterior à própria criação da teoria. Mas, a Transposição Didática explicita o que de fato ocorre no processo de transposição dos saberes para a sala de aula, orientando a construção dos objetos de ensino. Ela, principalmente, revela que esse processo de transformação sofrido pelo conhecimento não é uma simplificação.

Difundir, propiciar o acesso ao conhecimento para os não iniciados é um dos objetivos da construção do saberes escolares. Contudo, tal ideal não consiste de uma mera simplificação. Exigir do aluno um nível de sofisticação formal, conceitual, menor, mais simples, é uma necessidade. E esse processo implica a agregação de outros valores, próprios ao ato de educar, e adequados ao nível cognitivo dos alunos. Neste caso, não há como só simplificar. A simplificação é uma simplória idéia do que ocorre no processo de ensino.

No caso do ensino da Mecânica Quântica essa constatação é de profunda importância. A concepção de que se trata de simplificações pode levar os físicos mais puristas a desconsiderarem iniciativas como a nossa, argumentando que o que apresentamos não foi Mecânica Quântica. Certamente não o foi no sentido “estrito”, de passar regras de cálculo. Contudo, os alunos parecem ter percebido que a Física Quântica fornece um novo olhar sobre os fenômenos microscópicos.

Trata-se de uma “Física Quântica Escolar”, como qualquer outro conteúdo que figura nos programas curriculares. A intenção, em momento algum, foi a formação de físicos. Este é um dos inúmeros fatores que justificam uma outra reestruturação dos saberes quando transpostos para a sala de aula. Não queremos sequer insinuar que nosso trabalho é a panacéia para o ensino de FMC no Ensino Médio, mas desconsiderar o processo de transposição só trará preconceito e, quem sabe, mais vinte anos de pesquisas inócuas.

Encontramos nos escritos de Italo Calvino uma síntese das discussões trazidas neste trabalho. Ele, brilhantemente, resume o problema de se enfrentar a realidade, seja a realidade metafísica, a realidade imposta pela Mecânica Quântica ou aquela imposta pelo nosso Sistema de Ensino. Acreditamos que a única atitude possível para os educadores é não fugirmos dela.

“Por um lado, existe a atitude hoje necessária para enfrentar a complexidade do real, rejeitando as visões simplistas que apenas confirmam os nossos hábitos de representação do mundo; hoje precisamos de um mapa do labirinto, o mais pormenorizado possível. Por outro lado, há o fascínio do labirinto enquanto tal, do perder-se no labirinto, do representar esta ausência de caminhos de saída como a verdadeira condição do homem. No distinguir os dois propósitos um do outro queremos pôr a nossa atenção crítica, tendo todavia presente que nem sempre se podem distinguir com um corte nítido [...] Fica de fora quem acredita poder vencer os labirintos fugindo da sua dificuldade [...] É o desafio ao labirinto que desejamos salvar [...] e distinguir da [...] redenção ao labirinto”.

Italo Calvino

Bibliografia

- ABELL, S. K., SMITH, D. C., What is science? Preservice elementary teachers'conceptions of the nature of science. **International Journal of Science Education**, 16, 4, 475-487, 1994.
- ALTHEIDE, D.; JONHSON, J. M. Criteria for Assessing Interpretative Validity in Qualitative Research. **Handbook of qualitative research** – DEZIN, N. K. & LINCOLN, Y. S. (eds), Sage publications, international educational and professional publisher, Thousand Oaks, London, New Delhi, 1994.
- ALVES-FILHO, J. P. **Atividades Experimentais: Do Método á Prática Construtivista**. Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, 2000.
- ANGOTTI, J. A. P. Física e Epistemologia Heterodoxas: David Bohm e o Ensino de Ciências, **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.19, número especial, p.126-156. 2002.
- ARONS, A. B. **A guide to introductory physics teaching**, New York: John Wiley, 1990.
- ARRUDA, S.M. E TOGINHO FILHO, D.O. Laboratório Caseiro: Laboratório Caseiro de Física Moderna, **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, vol. 8, nº 3: p. 232-237, Florianópolis, dez. 1991.
- ASPECT, A., GRANGIER, Ph. ROGER, G., Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem. **Physical Review Letters**, 47 (7) p.460-463, 1981.
- ASTOLFI, J. P. e DEVELAY, M. **A Didática das Ciências**. Papirus. Campinas, 1995.
- ASTOLFI, J. P. Trois paradigmes pour lês recherches em didactique. **Reveu Français de Pédagogie**, n.103, p.5-18, 1993.
- _____ Et al Mots-clés de la didactique des sciences. **Pratiques Pédagogiques** De Boeck & Larcier S.A Bruxelles/Belgique. 1997.

- AUSUBEL, D.P; NOVAK, J.D; HANESIAN, H. **Psicologia Educacional**, Interamericana, Rio de Janeiro, 1980.
- BACHELARD, G. **A Formação do Espírito Científico**. Contraponto, Rio de Janeiro, 1996.
- BAROJAS, J. **Cooperative networks in physics education**. New York: American Institute of Physics conference Proceedings, 1988.
- BARRA, E. O. A realidade no mundo da ciência: um desafio para a história, filosofia e a educação científica. **Revista Ciência & Educação**, vol.5, n.1, 15-26, 1998.
- BEAUREGARD, O. C., O terceiro temporal do século XX: o paradoxo de Einstein (1927), ou de Einstein – Podolsky – Rosen (1935). **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, Campinas, n.3, p.43-58, 1982.
- BECKER, F. **A Epistemologia do Professor**. Vozes, Petrópolis, 1997.
- BECKER, H. S. **Métodos de Pesquisa em Ciências Sociais**. Hucitec, São Paulo, 1993.
- BERGER, P., LUCKMANN, T., **A construção social da realidade: tratado de sociologia do conhecimento**. Vozes, Petrópolis, 1973.
- BOHM, D., AHARONOV, Y., Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, Podolsky. **Physical Review**, 108 (4) p.1070-1076, 1957.
- BOHR, N. **Física Atômica e Conhecimento Humano**. Contraponto, Rio de Janeiro, 2000.
- BONJORNO, J. R., CLINTON, M. R., **Física: História & Cotidiano – volume 3**. FTD, São Paulo, 2003.
- BORGES, O. N; BORGES, A. T; GOMES, A. E; TERRAZZAN, E. A. Reformulação do Currículo de Física do Ensino Médio em Minas Gerais: Versão Preliminar do Currículo Proposto. **Atas do XII SNEF**. p. 213-226, Jan. 1997.

BRASIL. **Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio**. Ministério da Educação/Secretaria da Educação Média e Tecnológica, Brasília, 1999.

_____. **PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio**. Ciências da natureza, Matemática e suas tecnologias. Ministério da Educação/Secretaria da Educação Média e Tecnológica, Brasília, 2002.

BRONOWSKI, J. **A Escalada do Homem**. Martins Fontes, São Paulo, 1973.

BROUSSEAU, G. Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. **Recherches en Didactique des Mathématiques**, v. 7, n. 2, Grenoble, 1986.

BROWN, H. R. o problema da medida na mecânica quântica: uma avaliação das provas de insolubilidade existentes. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, Campinas, n.9, p.5-33, 1986.

_____. O debate Einstein-Bohr sobre a mecânica quântica. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência** 2: p.51-89 1981.

BUNGE, M. **Filosofia da Física**. Perspectiva, São Paulo, 2000.

_____. **Física e Filosofia**. Perspectiva, São Paulo, 1969.

_____. **Teoria e realidade**. Perspectiva, São Paulo, 1973.

_____. **Dicionário de Filosofia**. Perspectiva, São Paulo, 2002.

CAJAS, F. Alfabetización Científica y Tecnológica: la transposición didáctica del conocimiento tecnológico. **Ensenanza de las Ciencias**, 19(2):243-254, 2001.

CALÇADA, C. S., **Física - Sampaio & Calçada – volume único**. Atual, São Paulo, 2003.

CALVINO, I. **Una pietra sopra. Discorsi di letteratura e società**. Arnoldo Mondadori, Milão. 1995.

CARRON, W., GUIMARÃES, O. **As Faces da Física – volume único**. Moderna, São Paulo, 1997.

CARVALHO NETO, R.A., FREIRE Jr. O., ROCHA, J.F.M. Revelando o caráter determinístico da Mecânica Quântica – uma ponte para o ensino de física moderna no segundo grau. **Ideação**, Feira de Santana, v. 3, n.1, p. 51-68, mar. 1999.

CARVALHO, A. M. P. Critérios Estruturantes para o Ensino das Ciências. **Ensino de Ciências: unindo a pesquisa e a prática**. Pioneira Thomsom Larning, São Paulo, 2004.

CATELLI, F.; PEZZINI, S. Laboratório Caseiro: Observando Espectros Luminosos Espectroscópio Portátil. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 19, n. 2, ago. 2002.

CAVALCANTE M. A. O Ensino de uma Nova Física e o Exercício da Cidadania. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 21, n. 4, dezembro, 1999.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO; C. R. C. Uma oficina de física moderna que vise a sua inserção no ensino médio. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 18, n. 3, p. 298-316, dez. 2001.

CHALMERS, A. F. **O que é a Ciência Afinal?** Brasiliense, São Paulo, 2001.

_____ **A fabricação da ciência**. Fundação editora da Unesp, São Paulo, 1994.

CHEVALLARD, Y. **La Transposición Didáctica: Del Saber Sabio Al Saber Enseñado**. La Pensée Sauvage, Argentina, 1991.

CHIBENI, S. S. **Aspectos da descrição física da realidade**. Centro de Lógica e Epistemologia da Unicamp (CLE/UNICAMP), 1997.

_____ Implicações filosóficas da microfísica. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, 2 p.141-64, 1992.

_____ A inferência abductiva e o realismo científico. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, 6 p. 45-74, 1996.

- COHEN, L.; MANION, I. **Research Methods an Education**. London: Croom Helm, 1980.
- COLINVAUX, D. (org.) **Modelos e Educação em Ciências**. Rio de Janeiro: UFF/ PUC-RIO/ MAST/ UFSC, 1998.
- CUPANI, A. e PIETROCOLA, M. A relevância da epistemologia de Mario Bunge para o Ensino de Ciências. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, vol.19, n. especial, pp. 97-122, 2002.
- CUPPARI, A., RINAUDO, G., ROBUTTI, O., VIOLINO, P. Gradual Introduction of Some Aspects of Quantum Mechanics in a High School Curriculum. **Physics Education**, Bristol, v. 32, n. 5, p. 302-308, Sept. 1997.
- CUSTÓDIO, J. F. **Princípios de conservação e construção de modelos por estudantes do ensino médio**. Dissertação de mestrado UFSC, Florianópolis, 2002.
- DAGHER, Z. **O Caso das Analogias no Ensino da Ciência para a Compreensão**. Em Mintzes, J.J., Wandersee, J.H. & Novak, J.D. (Eds.). *Ensinando Ciência para a Compreensão*. Lisboa: Plátano Edições Técnicas, 2000.
- _____. Analysis of Analogies Used by Science Teachers. **Journal of Research in Science Teaching**, 32 (3), 1995a.
- _____. Review of Studies on the Effectiveness of Instructional Analogies in Science Education. **Science Education**, 79 (3), 1995b.
- DE LANDSHEERE, G. History of educational research. **Educational research, Methodology and measurement: An international handbook**. Oxford, Pergamosn Press, 1988.
- DUIT, R. On the Role of Analogies and Metaphors in Learning Science. **Science Education**, 75 (6), 649-672. 1991
- EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B. & ROSEN, N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be considered Complete? **Physical Review** 47: 777-780, 1935. Reimpresso em WHEELER & ZUREK 1983, p. 138-141. Traduzido para o português em **Cadernos de História e Filosofia da Ciência** 2: 90-96, 1981.

- EISBERG, R., RESNICK, R. **Física Quântica**. Campus, Rio de Janeiro, 1986.
- ERICKSON, F. Qualitative Research Methods for Science Education, In: Fraser, B.J. e Tobin, K.G. (orgs.), **International Handbook of Science Education**, Part One. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- FAGUNDES, M. B. **Ensinando a dualidade onda-partícula sob uma nova óptica**, Dissertação de mestrado FEUSP/IFUSP, São Paulo, 1997.
- FAUSTO-STERLING, A. Dualismos em duelo. **Cadernos Pagu**, nº 17/18, p. 9-79. 2001.
- FEYNMAN, R. P. **Lectures on Physics**, Addison Wesley, California, 1964.
- FINE, A. **The Natural Ontological Attitude**. LEPLIN, p. 83-107, 1984.
- _____. Insolubility of the quantum measurement problem. **Physical Review D**, v.2, n.12, p.2783-7, 1970.
- FISCHLER, H., LICHTFELDT, M. Learning Quantum Mechanics. **Research in Physics Learning, Theoretical Issues and Empirical Studies**. Proceedings of the International Workshop, Bremen, 1991.
- _____. Modern Physics and Students' Conceptions, **Journal of Science Education**, London, v. 14, n. 2, p. 181-190, Apr./June 1992.
- FORD, K. W. **The Quantum World : Quantum Physics for Everyone**. Harvard University Press, London, 2004.
- FOGEL, G. **Conhecer é criar: um ensaio a partir de Friedrich Nietzsche**. Unijuí. São Paulo, 2003.
- FREIRE JR, O. **David Bohm e a Controvérsia dos Quanta**. Centro de Lógica e Epistemologia da Unicamp (CLE/UNICAMP). 1999.
- FREIRE JR, O., CARVALHO NETO, R. A. de, ROCHA, J. F. M., VASCONCELOS, M., J. L., SOCORRO, M., ANJOS, E. L. Introducing Quantum Physics in Secondary School,

Proceedings of Third International History, Philosophy and Science Teaching Conference, Minneapolis, v.1 p. 412-419, 1995.

FREIRE, P. **Pedagogia do Oprimido**. 17ª ed.. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1987.

FRENCH, A. P e KENNEDY, P. J. (orgs). **Niels Bohr: A Centenary Volume**, Harvard University Press, Cambridge, 1985.

GADDIS, B. **Learning in a Virtual Lab: Distance Education and Computer Simulation**. Doctoral Dissertation University of Colorado, 2000.

GALLI, C. Produção de Hologramas com Equipamentos de Baixo Custo. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, vol. 10, nº 3: p. 258-262, Florianópolis, dez. 1993.

GASPAR, A., **Física: Eletromagnetismo e Física Moderna – volume 3**. Ática, São Paulo, 2003.

_____. **Física: Eletromagnetismo e Física Moderna – volume 3. Manual do Professor**. Ática, São Paulo, 2003.

GIL, D. P., SENENT, F., SOLBES, J. La Introducción a La Física Moderna: Un Ejemplo Paradigmático de Cambio Conceptual. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, p. 209-210, set. 1987. n. extra.

GIL, D. P., SOLBES, J. The Introduction of Modern Physics: overcoming a deformed vision of science. **International Journal of Science Education**, London, v. 15, n. 3, p. 255-260, May/June 1993.

GILBERT, J. K. & BOULTER, C. J. **Developing Models in Science Education**. Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publishers, 2000.

GONÇALVES FILHO, A. TOSCANO, C. **Física para o Ensino Médio – volume único**. Scipione, São Paulo, 2002.

GONÇALVES, M.E.R., **As Atividades de Conhecimento Físico na Formação do Professor das Series Iniciais**, Tese de Doutorado em Educação, FEUSP, São Paulo, 1997.

- GRECA, I. M, HERSCOVITZ, V. E. Mecânica Quântica e intuição. **Fundamentos da Física 2 - Simpósio David Bohm**. PESSOA JR (Org.) Livraria da Física, São Paulo, 2000 .
- GRECA, I.M., MOREIRA, M.A. Uma Revisão da Literatura sobre Estudos Relativos ao Ensino da Mecânica Quântica Introdutória. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 6, n. 1, 2001.
- HAACK, S. **Philosophy of Logics**. Cambridge, Cambridge University Press, 1978.
- HACKING, I. **Representing and Intervening**. Cambridge, Cambridge University Press, 1983.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. **Fundamentos de Física**. LTC, Rio de Janeiro, 1996.
- HEILBORN, M. L., Construção de si, gênero e sexualidade. **Sexualidade: o olhar das ciências sociais**. Jorge Zahar, Rio de Janeiro, 1999.
- _____. Ser ou estar homossexual: dilemas da construção da identidade social. **Sexualidades brasileiras**. Relume Dumará, Rio de Janeiro, p. 136-145, 1996.
- HEISENBERG, W. **A Parte e o Todo**, Contraponto, Rio de Janeiro, 2000.
- HESSE, M.B. **Models and Analogies in Science**. London: Sheed & Ward, 1966
- HERBERT, N. **A Realidade Quântica**. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1989. Original: Quantum Reality, 1985.
- HOLYOAK, K. J., THAGARD, P. **Mental Leaps: Analogy in Creative Thought**. The MIT Press, Cambridge, MA, 1995.
- HURD, P. D. **Science Literacy: Its Meaning for American Schools**. Educational Deadership, n. 16, p. 13-16, 1958.
- INHELDER, B.; GARCIA, R.; VONÈCHE, J. **Epistemologia genética e equilíbrio**. Horizonte Universitário, Lisboa, 1978.

IRWIN, A. R., Historical case studies: teaching the nature of science in context. **Science Education**, 84, 1, 5-26, 2000.

JAMMER, M. **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**. Nova Iorque: Wiley, 1974.

_____. **The philosophical development of quantum mechanics**. New York -McGraw-Hill. 1966.

JONES, D. G. C. Teaching modern physics -misconceptions of the photon that can damage understanding. **Physics Education**, Bristol, v. 26, n.2, p. 93-98, Mar. 1991.

KALINOWSKI, H.J. E GARCIA, N.M. Laboratório Caseiro: Uma Alternativa Econômica para Redes de Difração no Laboratório de Ensino. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, vol. 7, nº 1: p. 64-73, Florianópolis, abr. 1990.

KANT, I. **Crítica da Razão Pura**, Martin Claret, São Paulo, 1989.

KEITH S. TABER - **Learning Quanta: Barriers to Stimulating Transitions in Student Understanding of Orbital Ideas**. Wiley InterScience 2004, (www.interscience.wiley.com)

KITCHER, P. The Naturalism Return. **Philosophical Review**, v.10 n.1, 1993.

KRAGH, H. A sense of History: history of science and the teaching of introductory quantum theory. **Science & Education**, Dordrecht, v. 1, p. 349-363, 1992.

KUHN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo: editora Perspectiva, 1987.

LABURÚ, C. E., SIMÕES, A. M., URBANO, A. A. Mexendo com polaróides e mostradores de cristais líquidos (o ensino de Física contemporânea tendo como pano de fundo a física do cotidiano). **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 15, n. 2, p. 192-202, ago. 1998.

- LABURÚ, C. E.; SILVA, M. R. Do relativismo no ensino de física ao objetivismo na física. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 2, p. 1-35, 2000.
- LAWRENCE, I. Quantum physics in school. **Physics Education**, Bristol, v. 31, n. 5, p. 278-286, Sept. 1996.
- LAWSON, A. The Importance of Analogy: A Prelude to the Special Issue. **Journal of Research in Science Teaching**, 30(10), 1213-1214. 1993.
- LEMKE, J. L., Talking physics. **Physics Education**, n.17, p. 263 – 267. 1982.
- _____. **Aprender a hablar ciencia: lenguaje, aprendizaje y valores**. Paidós Barcelona, 1997.
- LOURO, G.L. (org.). **O corpo educado** - Pedagogias da sexualidade. Autêntica, Belo Horizonte, 1999.
- LÜDKE, M. e ANDRÉ, M. E. D. A. **Pesquisa em Educação: abordagens qualitativas**. São Paulo: E.P.U., EDUSP, 1986.
- MARTINAND, J.L. **Connaître et transformer la matière**, Peter Lang, Berna, 1986.
- MATTHEWS, M., **Science teaching: the role of history and philosophy of science**. Routledge, New York and London, 1994.
- MENEZES, L. C. E HOSOUME, Y. Para Lidar com o Mundo Real, A Física Escolar Também Precisa Ser Quântica. **Atas do XII SNEF**. p. 282-287, Jan. 1997.
- MERZBACHER, E. How shall we teach physics in the 21st century? **American Journal of Physics**, Woodbury, v. 58, n. 8, p. 717, Aug. 1990.
- MICHELINI, M. et all. Proposal for quantum physics in secondary school. **Physics Education**, London, v.35, n.6. p. 406-410, nov. 2000.
- MONTENEGRO, R. L., PESSOA JR., O. Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de física. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 7, n. 2, p. 1-20, ago. 2002.

- MOREIRA, M. A. **Pesquisa em Ensino: o vê epistemológico de Gowin** . EPU, São Paulo, 1990.
- MÜLLER, R.; WIESNER, H. Teaching quantum mechanics on an introductory level. **American Journal of Physics**, New York, v. 70, n. 3, p. 200-209, mar. 2002.
- NEWTON, D. **Supporting Understanding with Analogies. Teaching for understanding: what it is and how to do it**. London: RoutledgeFalmer, 2000.
- NOTT, M., WELLINGTON, J., Eliciting, interpreting and developing teachers' understanding of the nature of science. **Science & Education**, 7, 6, 579-594. 1998.
- OFUGI RODRIGUES, C. **Inserção da Teoria da Relatividade no Ensino Médio: Uma Nova Proposta**. Tese de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2001.
- OGBORN, J. (1997), "Constructivist metaphors of learning science", **Science & Education**, n. 6, 1997.
- OSBORNE, J. Beyond Constructivism. **Science Education**, v. 80, n.1, p. 53-82, 1996.
- OSTERMANN, F., RICCI, T.C.F. Construindo uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica: um estudo na formação de professores de física. **Ciência e Educação**, v.10, n. 2, 2004.
- OSTERMANN, F; MOREIRA, M. A; Uma Revisão Bibliográfica Sobre a Área de Pesquisa "Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio". **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, p. 23-48, 2000.
- PAIS, A., **"Sutil é o Senhor...": a ciência e a vida de Albert Einstein**. Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1982.
- PATY, M. **Matéria roubada**. Edusp, São Paulo, 1995.

PEREIRA, O. S; HAMBURGER, E. W; TASSARA, M. G.; BITTENCOURT, D. R.S.
Produção, Avaliação e Utilização de um Vídeo para o Ensino de Física Moderna –
Radiação Cósmica. **Atas do XII SNEF**. p. 314-326, Jan. 1997.

PESSOA JR., O. (org), **Fundamentos da Física – Simpósio David Bohm – volume 1**.
Livraria da Física, São Paulo, 2000.

_____. O Estudo da Medição em Mecânica Quântica: Um Exame Atualizado. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, Campinas, v.2, n.2, p.177-217, 1992.

_____. **Conceitos de Física Quântica**. Livraria da Física, São Paulo, 2003.

PIETROCOLA, M. A Relevância da Epistemologia de Mário Bunge para o Ensino de Ciências. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 19, n. especial: p. 97-121, Florianópolis, mar. 2002.

_____. A Matemática como estruturante do conhecimento físico, **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, n. especial, p 93-114, 2002a.

_____. Modelos e explicações: a construção da realidade e suas bases emocionais.
Projeto de pesquisa, CNPQ – não publicado, 2002b.

_____. Construção e Realidade: o realismo científico de Mário Bunge e o ensino de ciências através de modelos. **Investigações em ensino de ciências** Porto Alegre v. 4, n. 3, dez. 1999.

_____. Construção e Realidade: o papel do conhecimento físico no entendimento do mundo. **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**, Pietrocola, M. (org). Editora da UFSC/INEP, Florianópolis, 2001.

PIETROCOLA, M; BROCKINGTON, G. Recursos Computacionais Disponíveis na Internet para o Ensino de Física Moderna e Contemporânea. **Atas do IV ENPEC**. Bauru, São Paulo, novembro de 2003.

PINHEIRO, T. F. **Sentimento de realidade, afetividade e cognição no ensino de ciências**. Tese de Doutorado. Florianópolis: CED - UFSC, 2003.

- PINHEIRO, T. F., PIETROCOLA, M., ALVES-FILHO, J.P., Modelização de variáveis: uma maneira de caracterizar o papel estruturador da Matemática no conhecimento científico. **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**, Pietrocola, M. (org). Editora da UFSC/INEP, Florianópolis, 2001.
- PINTO, A.C., ZANETIC, J. É Possível Levar a Física Quântica para o Ensino Médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 16, n. 1, p. 7-34, abr. 1999.
- PLASTINO, C. **Realismo e anti-realismo acerca da ciência: Considerações filosóficas sobre o valor cognitivo da ciência**. São Paulo, Tese de Doutorado, USP. 1995
- POPPER, K. R. **Quantum Theory and Schism in Physics**. London, Hutchinson, 1982.
- REALE, G.; ANTISERI, D. **História da Filosofia** – Volumes 2, 3 e 4. Paulus, São Paulo, 2004.
- REDHEAD, M. **Da Física à Metafísica**. Papirus, Campinas, 1997.
- ROBILOTTA, M. **Construção e realidade no ensino de física**. São Paulo: Monografia IFUSP, 1985.
- _____. O Cinza, O Branco e o Preto - da Relevância da História da Ciência no Ensino da Física. **Caderno catarinense de Ensino de Física**, v. 5, n. especial, p. 7, 1987.
- ROBILOTTA, M. R., BABICHAK, C. C., Definições e conceitos em Física. **Cadernos Cedes**, ano XVIII, p.35-61, n. 41, julho, 1997
- RÜDINGER, E. On the teaching of introductory quantum mechanics. **American Journal of Physics**, New York, v. 44, n. 2, p. 144-148, Feb. 1976.
- SANTOS, A. M. N., AURETTA, C. **Uma Tarde com o Sr. Feynman**. Gradiva, Lisboa, 1991.

SEGRÈ, E. **Dos raios X aos Quarks. Físicos Modernos e suas Descobertas.** Universidade de Brasília, Brasília, 1982.

SILVA, C. J. **O efeito fotoelétrico. Contribuições ao ensino de física contemporânea no 2º grau.** Dissertação de mestrado em Ensino de Ciências, IF-FEUSP, São Paulo, 1993.

SILVA, M.R. Realismo e anti-realismo na ciência: aspectos introdutórios de uma discussão sobre a natureza das teorias. **Revista Ciência & Educação**, v.5, n.1, 7-13, 1998.

SMART, J.J.C. **Between Science and Philosophy.** New York: Random House, 1968.

SOLBES, J., CALATAYUD, M. L., CLIMENT, J. B., NAVARRO, J. Diseño de Un Currículum para La Introducción del Modelo Atómico Cuántico. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 5, p. 209-210, sept. 1987a. n. extra.

SOLOMON, J., Teaching for conceptual change: a review of strategies. **Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies. Proceedings of an International Workshop held at the University of Bremen**, Duit, R. et al.(Eds), 141-154. 1991.

SONGER, N. B., LINN, M. C., How do students' views of science influence knowledge integration? **Journal of Research in Science Teaching**, 26, 9, 761-784. 1991.

STANNARD, R. Modern Physics For The Young. **Physics Education**, Bristol, v. 25, n. 3, p. 133, May 1990.

STEFANEL, A. Una experiencia en el marco de la introducción de la física cuántica en la escuela secundaria. **Revista de Enseñanza de la Física**, Rosario, v. 11, n. 2, p. 35-44, nov. 1998.

SUTTON, C. Beliefs about Science and Beliefs about Language. **International Journal of Science Education**, 18(1), 1-18. 1996.

SWINBANK, E. Particle Physics: a new course for schools and colleges. **Physics Education**, Bristol, v.27, n.2, p.87-91, Mar. 1992.

- TAVOLARO, C.R.C., CAVALCANTE, M. A., **Física Moderna Experimental**. Manole, São Paulo, 2003.
- THAGARD, P. Analogy, Explanation, and Education. **Journal of Research in Science Teaching**, 29, 537-544. 1992.
- TERRAZZAN, E. A Inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na Escola de 2º Grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez. 1992.
- _____. **Perspectivas para a Inserção da Física Moderna na Escola Média**. Tese de Doutorado em Educação, FEUSP, São Paulo, 1994.
- TERRAZZAN, E; STRIEDER, D. M. Planejamentos Didáticos: Uma Agenda de Investigação para o Ensino de Física Moderna na Escola Média. **Atas do XII SNEF**. p. 606-613, Jan. 1997.
- TIERCELIN, C. Verbete “Realisme”. **Dictionnaire d’histoire et philosophie des sciences**, Lecourt, D. p. 803. Paris, 1999.
- TIPLER, P. A. **Física**. LTC, Rio de Janeiro, 1995.
- TREAGUST, D., HARRISON, A. & VENVILLE, G. Using an Analogical Teaching Approach to Engender Conceptual Change. **International Journal of Science Education**, 18 (2), 213-229. 1996
- VALADARES, E. C., MOREIRA, A. M. Ensinando física moderna no segundo grau: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 15, n. 2, p. 121-135, ago. 1998.
- VAN FRAASSEN, B. C. **The scientific Image**. Oxford, Clarendon Press, 1980.
- VEIT, E. A. & THOMAS, G. & FRIES, S. G. & AXT, R & SELISTRE, L. F. O Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio via Microcomputador, **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 4, n. 2: p. 68-88, Florianópolis, ago. 1987.

VEIT, E. A., THOMAS, G., FRIES, S. G., AXT, R., SELISTRE, L. F. O efeito fotoelétrico no 2º grau via microcomputador. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 4, n. 2, p. 68-88, ago 1987.

WHITTAKER, M. A B. History and quasi-history in physics education – part 1. **Physics Education**, v.14, 1979.

WILSON, B. Particle physics at A-level - a theacher's viewpoint. **Physics Education**, Bristol, v. 27, n. 2, p. 64-65, Mar. 1992.

YORE, L.D., BIRANZ, G.L., HAND, B.M. Examining the literacy componet of science literacy: 25 years of language arts and science research. **International Journal of Science Education**, v. 25, n.6, p.689-725, 2003

ZANETIC, J. **Física Também é Cultura**, Tese de doutorado, FEUSP, São Paulo, 1989.

ZEILLINGER, A. Experiment an the foundations of quantum physics. **Reviews of Modern Physics**, v.71, n.2 p.288-297, 1999