UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA
INSTITUTO DE QUÍMICA
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS
FACULDADE DE EDUCAÇÃO

LUÍS GOMES DE LIMA

A ABSTRAÇÃO COMO PONTE ENTRE A FÍSICA E A
LITERATURA NA CONSTRUÇÃO DE CONCEITOS DE
MECÂNICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO

SÃO PAULO

2014

LUÍS GOMES DE LIMA

A ABSTRAÇÃO COMO PONTE ENTRE A FÍSICA E A
LITERATURA NA CONSTRUÇÃO DE CONCEITOS DE
MECÂNICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação
Interunidades em Ensino de Ciências da Universidade de
São Paulo como requisito para obtenção do título de
Mestre em Ensino de Ciências.

Área de Concentração: Ensino de Física

Orientador: Prof. Dr. Elio Carlos Ricardo

SÃO PAULO

2014

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA
Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Lima, Luís Gomes de

A abstração como ponte entre a física e a literatura na construção de conceitos de mecânica quântica no ensino médio. - São Paulo, 2014.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.
Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química
e Instituto de Biociências.

Orientador: Prof. Dr. Elio Carlos Ricardo

Área de Concentração: Ensino de Física

Unitermos: 1. Física (Estudo e ensino); 2. ; Abstração
3. Física e literatura; 4. Formação de conceito; 5. Mecânica quântica (Estudo e ensino).

USP/IF/SBI-028/2014

Nome: Lima, Luís Gomes de

Título: A abstração como ponte entre a física e a literatura na construção de conceitos de mecânica quântica no ensino médio.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação Interunidades em Ensino de Ciências da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências.

Aprovado em: ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

TITULARES

Prof. Dr. Elio Carlos Ricardo

Instituição: Faculdade de Educação (FEUSP)

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. Luís Carlos de Menezes

Instituição: Instituto de Física (IFUSP)

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. José Alves da Silva

Instituição: Universidade Federal de São Paulo
(UNIFESP)

Julgamento: _____

Assinatura: _____

SUPLENTES:

Profa. Dra. Lúcia Helena Sasseron

Instituição: Faculdade de Educação (FEUSP)

Prof. Dr. João Zanetic

Instituição: Instituto de Física (IFUSP)

Profa. Dra. Andreia Guerra de Moraes

Instituição: Centro Federal de Educação
Tecnológica - CEFET (RJ).

Essa dissertação é dedicada à:

Luísa Brünnhild Oliveira Lima e,
Maria Luciana de Oliveira Lima

“Ab imo pectore”

Agradecimentos

Agradeço inicialmente à minha esposa e filha por terem suportado minha ausência durante a escrita dessa dissertação.

Ao professor Dr. Elio Carlos Ricardo, ser humano ímpar e dedicado ao ensino da ciência. Um orientador acolhedor, paciente e humano, de virtudes cada vez mais escassas nos dias de hoje. Meu eterno agradecimento, não somente por ter aceitado me orientar, mas por ter me conduzido à pesquisa que eu acreditava, pelas conversas e conselhos ao longo do meu mestrado, e pelo aprendizado acadêmico que tive, o que certamente me engrandeceu como pesquisador iniciante.

Ao professor Dr. Maurício Pietrocola que, juntamente com o professor Elio Carlos Ricardo, me introduziu no grupo do Núcleo de Pesquisa em Inovações Curriculares (NUPIC), onde tive o prazer e a honra de conhecer as pesquisas realizadas em contextos de inovação curricular e metodológica no ensino de física.

Aos colegas do Laboratório de Pesquisa e Ensino de Física (LAPEF) que sempre contribuíram com suas pesquisas e comentários.

Ao professor Dr. Luís Carlos de Menezes, primeiro pela oportunidade proporcionada a um professor de educação básica em realizar um mestrado e pela admiração que tive e tenho de estar próximo de tão célebres intelectos. Segundo, pelas suas aulas, pelas conversas, conselhos e indicações, que, sem sombra de dúvidas, resultaram em profundas reflexões, as quais me ampararam em muitos momentos de minha pesquisa. Terceiro, pela aceitação de participação em minha banca de qualificação, pelas sugestões e comentários que trouxeram uma melhora substancial ao texto.

Ao professor de física da FATEC-SP, Dr. Eduardo Acedo Barbosa, meu primeiro professor de física de nível superior, pela indicação ao mestrado, pelos ensinamentos em física e pelas conversas de corredor.

À Dra. Eliane Tigre da Faculdade de Medicina da USP, pela oferta do mestrado na área de pesquisa sobre os efeitos deletérios à saúde. Pelas longas conversas, orientações e leituras de teses realizadas. Apesar de ter declinado à oferta, com certeza, esse primeiro contato com o mundo acadêmico me ajudou profundamente nos meus estudos no mestrado em ensino de física.

Ao professor Dr. Marcelo Alves Barros do Instituto de Física de São Carlos, pela indicação da semiótica, em especial Duval (2005), como possibilidade de avaliar a conversão dos pseudoconceitos obtidos pela literatura em conceitos científicos.

Ao professor Dr. José Alves da Silva da Universidade Federal de São Paulo, por ter aceitado participar da minha banca de qualificação e pelas sugestões, que certamente resultaram em um ganho qualitativo impar em minha dissertação.

Ao Programa de Pós-Graduação Interunidades, professores e funcionários. Em especial aos funcionários da secretaria pela costumeira gentileza, competência e presteza no atendimento.

Aos meus colegas de mestrado e doutorado da Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências que sempre comungaram comigo a respeito da possibilidade de um ensino de física mais acolhedor.

A ABSTRAÇÃO COMO PONTE ENTRE A FÍSICA E A LITERATURA NA CONSTRUÇÃO DE CONCEITOS DE MECÂNICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO

RESUMO:

A presente pesquisa assume os pressupostos de uma investigação qualitativa de linha dialética que consiste em avaliar como a literatura contribui para formação de conceitos abstratos de Física Moderna e Contemporânea, em especial, conceitos de Mecânica Quântica, para alunos do 3º ano do Ensino Médio. A maneira como os alunos agem em seu meio social é investigada com o apoio da pseudoconcreticidade de Karel Kosík, que nos permite investigar a forma como agem entre si e como aceitam as propostas de ensino oferecidas em sala de aula. A Literatura, a analogia, a leitura e outros recursos linguísticos são tratados a partir da revisão de pesquisas realizadas nesse início de século. A formação de conceitos da Física Moderna e da Mecânica Quântica é investigada com o apoio do referencial interacionista de Vygotsky, que nos possibilitou avaliar como a literatura, por meio da palavra, transforma-se em outra estrutura semiótica, que leva à abstração e generalização de conceitos físicos. As respostas dadas pelos alunos em questionário aberto permitiu-nos confirmar o papel da literatura como ferramenta de ensino de física, que leva à abstração e formação de conceitos abstratos da física moderna.

Palavras-Chave: Abstração; Física e Literatura; Formação de Conceitos Físicos; Pseudoconceitos; Física Moderna e Contemporânea e Mecânica Quântica.

THE ABSTRACTION AS A BRIDGE BETWEEN PHYSICS AND LITERATURE IN THE BUILDING CONCEPTS OF QUANTUM MECHANICS IN HIGH SCHOOL

ABSTRACT:

This research, is a qualitative investigation in a dialectical line which aims to know how literature contributes to the formation of abstract concepts of Modern and Contemporary Physics, especially concepts of Quantum Mechanics for 3rd grade High School students. The way students act in their social environment is investigated through the support of pseudoconcreteness by Karel Kosík, which allows us to investigate how they act with each other and how they accept the teaching proposals offered in the classroom. Literature, analogy, reading and other language resources have been evaluated in current researches. The formation of physical concepts on Modern Physics and Quantum Mechanics are investigated, support by the interactionism of Vygotsky, which enabled us to investigate how the literature, by means of the word, becomes another semiotic structure, which leads to abstraction and generalization of physical concepts. The answers given by the students, in an open questionnaire, confirm the literature as a tool for physics education, especially abstract concepts of modern physics.

Keywords: Abstraction; Physics and Literature; Physical Training Concepts; Pseudo Concepts; Modern and Contemporary Physics and Quantum Mechanic.

“A experiência prática mostra também que é impossível e estéril ensinar os conceitos de uma forma direta. Um professor que tenta conseguir isto habitualmente mais não consegue da criança do que um verbalismo vazio, um psitacismo que simula um conhecimento dos conceitos correspondentes, mas que na realidade só encobre um vácuo”.

Vygotsky

Sumário

1. Prólogo	1
2. A Jornada.....	3
3. A Escolha do Tema de Pesquisa e Como Abordá-la.....	12
4. Estrutura dos Capítulos.....	15
5. Bases Teórico-Metodológicas para o enfoque dos problemas e perspectivas inerentes à inserção da literatura no ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: Uma introdução.....	17
6. O Problema de Pesquisa e os Objetivos	32
7. Conjectura sobre os Referenciais Teórico-Metodológicos Gerais	34
Capítulo I.....	39
1.1 A física e a Literatura	40
1.2 Analogia no Ensino de Ciências/Física	55
1.3 Quando a Estátua de Santo pode Viver Santo	62
1.4 A Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio.....	72
Capítulo II	79
2.1 A Pesquisa Qualitativa.....	79
2.2 A Linha Dialética de Pesquisa.....	87
2.3 A Dialética do Concreto	90
Capítulo III.....	100
3.1 A Obra de Lev Semionovitch Vygotsky.....	100
3.2 O Pensamento e a Linguagem	103

3.3 Os Estudos sobre a Formação de Conceitos	105
3.4 As Etapas de Formação de um Conceito	108
3.5 O Desenvolvimento dos Conceitos Científicos	115
Capítulo IV	127
4.1 A Interação entre os Alunos e a Escola	131
4.2 A Relação dos Alunos com as Aulas de Física.....	135
4.3 Início dos Estudos	138
4.4 Pela Toca do Coelho ou pelo Tubo de Raios Catódicos?	147
4.5 E Depois da Leitura	159
8. Epílogo	199
9. Referências Bibliográficas.....	205
10. Anexos	229
Anexo I	229
Anexo II.....	284
Anexo III	284
Anexo IV	285
Anexo V	318

1. PRÓLOGO

Não faças versos sobre acontecimentos.
Não há criação nem morte perante a poesia.
Diante dela, a vida é um sol estático,
não aquece nem ilumina.
As afinidades, os aniversários, os incidentes pessoais não contam.
Não faças poesia com o corpo,
esse excelente, completo e confortável corpo, tão infenso à efusão lírica.

Tua gota de bile, tua careta de gozo ou de dor no escuro
são indiferentes.
Nem me reveles teus sentimentos,
que se prevalecem do equívoco e tentam a longa viagem.
O que pensas e sentes, isso ainda não é poesia.

Não cantes tua cidade, deixa-a em paz.
O canto não é o movimento das máquinas nem o segredo das casas.
Não é música ouvida de passagem, rumor do mar nas ruas junto à linha de espuma.

O canto não é a natureza
nem os homens em sociedade.
Para ele, chuva e noite, fadiga e esperança nada significam.
A poesia (não tires poesia das coisas)
elide sujeito e objeto.

Não dramatizes, não invoques,
não indagues. Não percas tempo em mentir.
Não te aborreças.
Teu iate de marfim, teu sapato de diamante,
vossas mazurcas e abusões, vossos esqueletos de família
desaparecem na curva do tempo, é algo imprestável.

Não recomponhas
tua sepultada e merencória infância.
Não osciles entre o espelho e a
memória em dissipação.
Que se dissipou, não era poesia.
Que se partiu, cristal não era.

Penetra surdamente no reino das palavras.
Lá estão os poemas que esperam ser escritos.
Estão paralisados, mas não há desespero,
há calma e frescura na superfície intata.
Ei-los sós e mudos, em estado de dicionário.
Convive com teus poemas, antes de escrevê-los.
Tem paciência se obscuros. Calma, se te provocam.
Espera que cada um se realize e consume
com seu poder de palavra
e seu poder de silêncio.
Não forces o poema a desprender-se do limbo.
Não colhas no chão o poema que se perdeu.
Não adules o poema. Aceita-o
como ele aceitará sua forma definitiva e concentrada
no espaço.

Chega mais perto e contempla as palavras.
Cada uma
tem mil faces secretas sob a face neutra
e te pergunta, sem interesse pela resposta,
pobre ou terrível, que lhe deres:
Trouxeste a chave?

Repara:
ermas de melodia e conceito
elas se refugiaram na noite, as palavras.
Ainda úmidas e impregnadas de sono,
rolam num rio difícil e se transformam em desprezo (Poema de Carlos Drummond de
Andrade, intitulado *Procura da Poesia*, in: Andrade, 1969).

À guisa de uma apresentação, inicio com esse antológico poema de Carlos Drummond de Andrade, demonstrando a mesma aflição de quem procura pelas palavras adequadas para seu escrito e, após longo e desesperador silêncio, percebe não existir palavras mais certas ou mais erradas a serem empregadas.

Assim, como descrito na primeira parte do poema, há certas proibições sobre o que não deve ser escrito; a preocupação de quem escreve não deve, lembra o poeta, ser estabelecida nas emoções, no desespero, na memória, na sociedade ou no corpo. Na segunda parte do poema, alude-se para a preocupação com a linguagem, assim, a escrita até pode ter os caracteres proibitivos descritos na primeira parte, ou seja, podem possuir temática social, emotiva ou existencial, mas, sobretudo, deve ter cuidado com a elaboração textual, saber lidar com a função da linguagem.

Imbuído desse auxílio poético, resta-me estabelecer a escrita dessa dissertação, lembrando-me do caráter de meu escrito enquanto trabalho científico, procurando estabelecer a função de linguagem própria do “esqueleto” que um trabalho acadêmico exige e deve possuir.

Após longo período de contemplação, aguardando as palavras certas, enquanto o prazo deste escrito se esvai, resta-me aceitar as palavras que me aparecem, e que sua forma “definitiva e concentrada no espaço” se instaure.

E, apesar do alerta do poeta descrito na sexta estrofe do poema, parece-me pouco possível não recordar de minha trajetória até aqui, bem como delinear o caminho que me trouxe à educação e à pesquisa, apontando escolhas que aparentam fugir a certo senso comum. Assim, descreverei nesta apresentação, em formato de relato autobiográfico, meu percurso acadêmico até o presente momento, bem como procurarei delinear os motivos que me levaram a escolha do meu tema de pesquisa e a forma como desenvolvi meu estudo nesse período na pós-graduação.

2. A jornada

Iniciei meus estudos de graduação em 1998, ao ingressar no curso de Projetos Mecânicos da FATEC-SP, onde conheci o professor Eduardo Barbosa, que havia lecionado para mim a disciplina de física e cujas aulas despertaram-me um desejo pelo aprendizado em física, que já era recorrente no meu antigo segundo grau, mas muito imaturo ainda. Durante suas aulas e conversas que tivemos pude me aproximar mais da física; é claro que não ainda em nível de ensino, pois minha admiração resultava no nível de possibilidades de resolução de problemas diversos voltados a inúmeras situações vivenciadas pela engenharia mecânica, apresentadas tanto pelo professor, quanto pelo livro de Mecânica Fundamentos de Física 1 do Halliday e Resnick que usávamos nas aulas. Algum tempo depois o professor Eduardo Barbosa forneceu-me uma carta de recomendação ao mestrado em ensino de física.

Entre atuações profissionais na área industrial e as aulas que cursava nessa graduação, fui convidado por um amigo a me inscrever numa escola estadual da cidade de Francisco Morato, na grande São Paulo, pois estavam com falta de professores de matemática e física. Eu nunca havia lecionado antes, mas internamente o desafio me instigava, o que me levou a aceitar o convite, afinal de contas, naquela época eu

pensava que bastava ser um bom resolvidor de continhas para dar aulas, o que hoje eu denomino de “professor continha”, assim acabei inscrevendo-me no ano de 2001 na Escola Estadual Editor José, onde lecionava como professor substituto as disciplinas de matemática e física. Posteriormente, inscrevi-me em escolas do município de Franco da Rocha, onde continuei lecionando como professor substituto e, eventualmente, também tinha atribuição de salas próprias para lecionar física.

Em 2003 eu me formei em Projetos Mecânicos e, em seguida, ingressei em nova graduação, agora no curso de Processos de Produção, também pela FATEC-SP, onde me graduei em 2006. Foi justamente nessa segunda graduação, onde oscilava trabalhando na área industrial, cujas colocações profissionais estavam cada vez mais concentradas no interior do Estado, e atuando como professor nas escolas públicas, que acabei me identificando mais com a área educacional, ocasião em que passei a estudar com afinco e me dedicar a cursos neste segmento. Tal escolha profissional levou-me a novos estudos, agora, estritamente, nas áreas da educação.

Também foi em 2003 que ingressei na licenciatura em Física no antigo CEFET-SP, atual Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo. Cursei apenas dois semestres e abandonei o curso por dois motivos: primeiro, as aulas eram no período da manhã, justamente o período em que precisava lecionar para me manter, e, segundo, porque havia muitas greves na época, o que acabou transformando os dois semestres em apenas um. Além desses empecilhos, minha primeira impressão da licenciatura em física não foi muito boa, pois esperava mais do curso, do que as mesmas aulas por repetição de exercícios que havia visto nas minhas duas graduações anteriores na área de mecânica.

Em 2005 realizei um curso, concomitantemente ao curso de Processos de Produção, na área de formação pedagógica em Matemática, pela Universidade Bandeirante, habilitando-me a lecionar matemática para o ensino básico. Imbuído deste interesse, em 2007, logo após a conclusão do curso em Processos de Produção, graduei-me em Licenciatura Plena em Pedagogia, com habilitação em coordenação e supervisão escolar, também pela Universidade Bandeirante. Os dois cursos me propiciaram atuar na educação com maior respaldo teórico, entendendo muito mais as reuniões pedagógicas de que participava.

Entre uma e outra escola lecionando física, em momentos que às vezes se somavam três períodos, das 07:00 h às 23:00 h, passei a verificar que ser um “professor continha” não era suficiente. Muitas vezes, ficava extenuado resolvendo problemas difíceis para os alunos no quadro negro, mostrando soluções de questões de vestibular, mas sentia que faltava algo. E, apesar dos elogios dos diretores e coordenadores das escolas em que trabalhava, por ser um bom professor, o que significava para eles dar aula, ao invés de ficar conversando com os alunos, não faltar e resolver contas, eu sentia, *passim*, um mundo desconhecido para mim no ensino de física, mas que parecia existir. À parte da minha formação inicial em exatas, sempre gostei de ler, por prazer mesmo, e me recordo que o pouco tempo que passei como aluno de licenciatura em física, no antigo CEFET-SP, em uma aula de Mecânica com o professor Marcelo de Carvalho Bonetti, que inclusive foi aluno da Universidade de São Paulo (USP), no programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências, o mesmo havia comentado, por cima, sobre as relações entre física/literatura e física/poesia. Na época fiquei meio desconfiado disso, mas sentia haver essa aproximação. E foi, muito tempo depois, em uma aula que eu ministrava sobre gravitação para alunos do 1º ano do Ensino Médio (EM), que recordei de versos de Luís de Camões, que retratavam a visão de mundo

geocêntrica. Comentei com os alunos e eles ficaram maravilhados com essa aproximação, assim como eu.

Nesse interim, como na realidade não lecionava matemática, mas sim física, constatei a necessidade de realizar novo investimento educacional em minha formação, decorre disto que em 2008 iniciei minha pós-graduação Lato Senso no curso de Metodologias do Ensino de Física, pela Universidade Gama Filho, tendo-o findado e me tornado especialista em janeiro de 2010, onde apresentei como TCC um artigo sobre a Presença da Física na Literatura: Uma abordagem sobre a Física na Obra a Volta ao Mundo em 80 dias de Júlio Verne. A ideia desse TCC veio a minha mente, pensando justamente em decorrência de minha prática como professor, devido ao problema de como poderia ensinar a física utilizando como ferramenta adicional a literatura, a fim de conseguir o mesmo deslumbramento, admiração e aceitação por parte dos alunos, que havia verificado quando mesclei o ensino de física com versos de camões.

No meio do curso desta especialização, no mês de janeiro de 2009 inscrevi-me no curso de extensão universitária, Noções de Meteorologia para o Ensino Médio destinado a professores, pelo Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo. Também havia ingressado em 2009 no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), no curso de licenciatura no período noturno. Excetuando-se algumas aulas de cunho mais empírico, fiquei decepcionado com as aulas teóricas, onde eu vislumbrava nos meus professores o mesmo “professor continha” que eu tinha sido até então. Nessas aulas, não havia espaço para discussão epistemológica, para filosofia ou história da ciência, e curiosamente quando eu interpelava a respeito desses assuntos era prontamente podado, pois não havia tempo, uma vez que tínhamos um programa fechado a cumprir, que se resumia a resolução de exercícios, além de listas e mais listas de exercícios. Eu já havia passado por isso, e não era exatamente o que procurava. Eu

não queria mais saber sobre como aplicar o $F = m.a$, eu ansiava saber sobre Newton, sobre Galileu, sobre a Inquisição, se havia ou não relações de amizade entre Galileu e Kepler, se eles trocaram informações entre si, ou quais relações existiam entre Faraday e Maxwell, se foram as experiências de Faraday que levaram às equações de Maxwell, ou o contrário, ou se Mary Shelley estudava sobre eletricidade na época em que escreveu Frankenstein, etc.

Concomitantemente ao curso de licenciatura em física no IFUSP, também cursava licenciatura plena em física pela UNIMES, onde me formei em 2011. O coordenador desse curso era o professor Sérgio Corrêa Leite, ex-aluno do Programa Interunidades em Ensino de Ciências. Nessa licenciatura, obtive respostas a vários questionamentos de cunho histórico/filosófico que procurava, pois as aulas iam além dos cálculos e operações matemáticas. Foi através desta licenciatura que tive certeza sobre o que queria em minha formação: uma pós-graduação em ensino de física.

Entretanto, antes de participar da seleção para ingresso no mestrado em ensino de ciências em 2010, para início em 2011, havia sido convidado, ainda em 2009, pela Dra Eliane Tigre Guimarães Sant'Anna, da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (FMUSP), a escrever um projeto sobre uma proposta pedagógica a respeito do ensino da poluição atmosférica e seus efeitos deletérios à saúde por meio do biomonitoramento no Ensino Médio, para o setor de fisiopatologia experimental, ligado ao laboratório de investigação médica, coordenado pelo professor Dr. Paulo Hilário Nascimento Saldiva. Assim, entre as aulas que cursava e as que eu ministrava, comecei a frequentar a FMUSP, onde participava de reuniões com a Dra. Eliane Tigre e onde lia inúmeras teses sobre poluição atmosférica. Aprendi bastante sobre os efeitos deletérios à saúde provindos dos mais diversos meios, tais como queima de cana de açúcar, da fumaça expelida pelos veículos, da diminuição de fertilidade de agentes de trânsito que

ficavam em contato diário inalando monóxido de carbono e demais materiais particulados, ou dos malefícios em se consumir carne assada com carvão, entre outras pesquisas não menos interessantes. Cheguei a introduzir o bioindicador *Tradescantia pallida*, para alunos de uma escola particular que lecionava, a fim de coletar dados sobre a poluição atmosférica onde eles residiam, além de escrever o projeto para ingresso no mestrado naquela área. Contudo, não cheguei a ingressar de fato nesse mestrado, devido a minha aprovação na Pós-Graduação em Ensino de Ciências da USP, em 2010, para início no segundo semestre de 2011. Decidi adiar essa empreitada na área de saúde, para estudar na área que era minha paixão há muito tempo. Assim, decidi pelo mestrado em ensino, tendo iniciado meus estudos nessa pós-graduação em agosto de 2011.

Meu primeiro contato com meu orientador, o professor Elio Carlos Ricardo, deu-se antes do início das aulas. Em nossa primeira conversa tentava explicar os motivos que me levaram a procurar desenvolver um estudo a respeito do ensino da física, utilizando como recurso didático textos literários, como esses textos poderiam possibilitar uma aproximação com a filosofia e a história da física, bem como poderiam instigar nos alunos um maior interesse por uma física que fosse além das expressões matemáticas usuais nos livros de ensino de física e tão presentes nas salas de aula.

Em uma segunda conversa apresentei um pré-projeto sobre o ensino de física por meio da literatura, mais propriamente sobre o ensino de Cinemática usando trechos do *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo Ptolomaico e Copernicano* de Galileu Galilei, na tradução de Pablo Rubem Mariconda (2004). Contudo, a proposta era muito fraca para um mestrado. Tinha então que pensar em outro tema e meu orientador solicitou que eu pensasse melhor enquanto assistia às aulas da pós-graduação. Além das aulas, fui convidado para participar das reuniões do Núcleo de

Pesquisa em Inovações Curriculares (NUPIC), todas as terças-feiras no Laboratório de Pesquisa e Ensino de Física (LAPEF).

Essas reuniões foram fundamentais para me ajudar a delinear melhor minha pesquisa, pois nelas pude visualizar melhor o que significava a produção de uma pesquisa científica, principalmente em contextos de inovação curricular. Assim, pude verificar que um ensino inovador poderia ser desenvolvido mediante o ensino de física moderna e, também, por meio de textos literários, pois ambos são inovadores, uma vez que não estão, geralmente, presentes, tanto nos livros didáticos, quanto nas aulas de física. Além dessas contribuições, as reuniões me permitiram usufruir das discussões sobre diversos artigos específicos sobre ensino de física, mediadas pelo professor Maurício Pietrocola e meu orientador.

No 2º semestre de 2011, passei a cursar a disciplina: Os Fundamentos da Física e a Física Contemporânea como Conteúdos Instrucionais, ministrada pelo professor Luís Carlos de Menezes, onde trabalhamos com o aprendizado da Física Moderna e Contemporânea (FMC), por meio da leitura e discussão do livro *A Matéria Uma Aventura do Espírito* (MENEZES, 2005), além da produção de trabalhos próprios pelos grupos de alunos participantes. Nessa disciplina não me esqueço do carinho e atenção dedicados pelo professor Luís Carlos de Menezes, que promoveu um aprendizado horizontal com os alunos, e não vertical como de costume. Fiquei muito impressionado, pois nunca havia presenciado uma aula nos moldes propostos por Paulo Freire, ao menos não que funcionasse de fato, e essas aulas me deixaram muito admirado. Foi nessa primeira aula que tive a certeza de que queria realmente investigar como seria possível fornecer aos alunos um ensino de física horizontal, dialógico, que pudesse aparecer elementos da história e filosofia da física, e que fosse mais que o mero uso de expressões matemáticas. Também não me esqueço das conversas com o professor Luís

Carlos de Menezes, quando perguntava a ele sobre a proposta de minha pesquisa, sobre o que ele achava, se podia continuar insistindo nessa ideia, se a mesma poderia gerar frutos, e ele me respondia que era necessário tornar os alunos mais que meros agentes passivos do aprendizado, que fosse desenvolvido metodologias que possibilitassem que os alunos se tornassem protagonistas de seu aprendizado e não apenas meros coadjuvantes. Tais palavras ainda ecoam em minha mente e, acredito, tenha conseguido realizar um ensino, se não exatamente nesses moldes, muito próximo dele, como se verá mais adiante, quando explanarei a forma como desenvolvi a metodologia de ensino com meus alunos.

É válido lembrar que o início dessas aulas foi baseado na leitura do capítulo XVIII da *Era dos Extremos*, de Hobsbawn (1995), cujo texto, intitulado *Feiticeiros e Aprendizes*, apresenta as mudanças de paradigmas necessárias ao nascimento da física moderna, bem como a difícil aceitação por parte dos cientistas a respeito desse novo modelo de física, assim como a atual tecnologia, por meio de seus aparatos presentes na sociedade, que vem prontos para o uso, sem que seus usuários necessitem entender absolutamente nada sobre física e sobre os processos científicos para seu manuseio, demonstrando que “o aprendiz de feiticeiro não mais precisava se preocupar com sua falta de conhecimento”. Mais tarde, eu usei esse mesmo texto como introdução ao estudo de Física Moderna e Contemporânea (FMC), ao abordar elementos de Mecânica Quântica (MQ) com meus alunos.

A introdução desse texto, no início de minhas aulas na pós-graduação, trouxe-me muita satisfação, deixando-me convicto de que era possível inserir leituras e textos literários/históricos/filosóficos em aulas de física, com o intuito de contextualizar os conceitos físicos estudados.

Nesse mesmo semestre, cursei também a disciplina *Formação e Prática Docente na Educação em Ciências*, ministrada pela professora Maria Lucia dos Santos Vital Abib, onde estudamos sobre a formação de professores em ciências. As discussões promovidas pela professora foram essenciais para a delimitação da minha pesquisa. Principalmente, a leitura sobre o texto de Gérard Fourez, a respeito da crise no ensino de ciências (FOUREZ, 2003), onde se evidencia um crescente abandono dos jovens pelos cursos que envolvam as ciências em geral, apontando para a necessidade de uma redefinição da ciência escolar e na forma de condução das atividades de ensino. Isso, a meu ver, poderia ser promovido com a inclusão de um ensino de física mais agradável, com inserção de textos, leituras, analogias, metáforas, onde pudessem aparecer a história e a filosofia da física, facilitando um entendimento dos conceitos físicos estudados e desse sentido às fórmulas estudadas pelos alunos.

Nos Seminários Gerais de Ensino de Ciências II, assisti a diversas palestras sobre assuntos relacionados ao ensino de ciências, o que me auxiliou a formar uma boa base a respeito do ensino de física e também sobre a Pós-Graduação que agora fazia parte como aluno.

No meu segundo semestre, em 2012, matriculei-me na disciplina *Abordagens Interdisciplinares em Complexidade*, ministrada pelo professor Nelson Fiedler-Ferrara Júnior, onde estudei a Complexidade sob o foco biológico, físico e químico relacionando-a a contextos educacionais. Os processos de ensino recorrentes e anelares me deixaram muito admirado e, apesar de não utilizar propriamente contextos de complexidade como eixo norteador de minha dissertação, posso afirmar que foi um curso que muito acrescentou à minha formação cultural e que os diversos textos que lemos me ajudaram a acreditar em minha linha de pesquisa, pois o processo de ensino é, por natureza, complexo.

Na disciplina Seminários Vygotskianos I: Educação e Pesquisa na Perspectiva Histórico-Cultural, ministrada pela professora Teresa Cristina Rebolho Rego de Moraes, em 2012, foram desenvolvidos os estudos dos dois tomos das *Obras Escogidas* de Vygotsky. Em especial, dediquei atenção à formação de conceitos científicos, abordadas por Vygotsky em *Pensamento e Linguagem*, cujo livro, na tradução em português, já havia lido anteriormente ao curso, mas foi somente através das aulas que pude ter certeza da escolha de Vygotsky como referencial teórico para minha dissertação, pois sua teoria interacionista permitiu desenvolver o estudo da mecânica quântica com meus alunos e promover um ensino de física através da literatura.

Nas séries de palestras oferecidas pelos Seminários Gerais de Ensino de Ciências I, em 2012, pude assistir às apresentações de vários pesquisadores na área de ensino de ciências, que muito contribuíram para minha formação cultural em ciências, bem como para o melhor entendimento do funcionamento da pós-graduação, nos casos em que assuntos relevantes desse campo foram debatidos.

3. A escolha do tema de pesquisa e como abordá-la

Após esse período de disciplinas, em contato com o aprendizado que a pós-graduação me ofereceu, além das reuniões no NUPIC e conversas com meu orientador, pude concretizar minha linha de pesquisa como sendo o estudo sobre a forma como a abstração¹ presente na literatura pode contribuir para a formação e compreensão de pseudoconceitos² gerados pelas leituras que, tratados didaticamente, convertam-se em

¹ A abstração científica é definida por Khlyabich (1967, p.99): como operação por meio da qual a nossa mente, depois de distinguir os caracteres essenciais de um grupo de fatos, separa-os das propriedades secundárias para generalizá-los.

² Em seus estudos sobre a formação de conceitos, Vygotsky (1994; 2008) define o pseudoconceito como uma espécie de pensamento por complexo mais evoluído, sendo uma das etapas finais, atrás, somente, dos conceitos potenciais e desenvolvimento da abstração, para construção de um conceito. O pseudoconceito é dual por natureza, servindo de ponte entre um pensamento por complexo e um pensamento conceitual.

conceitos genuínos³, a respeito da física moderna e contemporânea, mais propriamente, sobre o ensino de mecânica quântica, por meio da leitura dos três capítulos do livro *Alice no País do Quantum*, de Robert Gilmore (1998). Outras leituras e recursos como vídeos, slides e filmes também foram usados e serão identificados mais adiante.

O uso da literatura, como ferramenta para o ensino de física, proporciona aos alunos uma aprendizagem horizontal⁴ e mais próxima de seu contexto cultural, quando comparadas com a educação verticalizada apoiada exclusivamente em abstrações matemáticas descontextualizadas. Como se verá, após a utilização das leituras e demais metodologias empregadas, os alunos compreenderam não só os conceitos de física moderna ministrados, mas, também, puderam compreender melhor o significado matemático de algumas expressões. Um bom exemplo foi a dualidade partícula-onda, na equação de Broglie $\lambda = \frac{h}{m.v}$, ao calcularem o comprimento de onda de uma partícula e de um corpo macroscópico, os alunos entenderam que ambos possuem comprimentos de onda; um considerável e outro desprezível; ou que um pode tunelar e outro não.

Por fim, no segundo semestre de 2012 dediquei-me a diversas leituras, a fim de ampliar meu entendimento sobre o ensino de física por meio do uso do recurso literário, além de melhorar minha compreensão a respeito da realidade na qual meus alunos vivem, procurando delinear uma pesquisa dialógica, problematizadora, qualitativa e dialética. Assim, os livros *Pedagogia do Oprimido* de Paulo Freire; *A formação do*

³ Para Vygotsky (1994; 2008) um conceito genuíno só surge quando os traços abstraídos são novamente sintetizados e a abstração sintetizada daí resultante se torna o principal instrumento de pensamento, sendo a palavra a principal responsável por esse processo.

⁴ No capítulo 3 da *Pedagogia do Oprimido*, Paulo Freire, ao tratar da dialogicidade, da educação dialógica e do diálogo, explica-nos que a relação horizontal entre professor e aluno surge do diálogo, onde a confiança mútua é natural e se estabelece nessa horizontalidade de ensino, sem a imposição verticalizada da educação tradicional e bancária, tão bem criticada por Paulo Freire. A educação horizontal, libertadora e problematizadora se estabelece, portanto, diametralmente oposta à educação bancária tradicional, onde o aluno se vê como mero receptor de informações prontas e acabadas. Em nosso trabalho acreditamos que o recurso da literatura permite fomentar um ensino de física horizontal.

Espírito Científico de Gaston Bachelard; Dialética do Concreto de Karel Kosik; Dialética do Esclarecimento de Adorno e Horkheimer; a releitura do Pensamento e Linguagem de Vygotsky; Pequena História da Filosofia de I. Khlyabich; Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação de Augusto Nibaldo Silva Triviños; Pesquisa em Educação: abordagens qualitativas de Menga Lüdke e Marli E. D. André foram de fundamental importância para o delineamento teórico-metodológico de minha pesquisa. Nesse período também ministrei as aulas a alunos do 3º EM, de uma escola privada, realizando a coleta de dados. Além disso realizei, também, a revisão de bibliografia, a respeito da relação entre a física e a literatura, uso de textos, de analogias, de metáforas, no ensino de física e no ensino de física moderna e contemporânea.

Dentro dessa perspectiva, torna-se importante salientar que a pesquisa realizada nesse trabalho consiste em uma pesquisa qualitativa de linha dialética “*soft*”⁵, por permitir analisar a realidade dos fenômenos estudados, da sociedade em que estão inseridos os alunos, de suas expectativas escolares, além das impressões destes em contato com os conceitos físicos abordados nesse estudo. Possibilita ainda melhor aproximação da essência do fenômeno desejado, bem como da forma como surgem os conceitos científicos nos alunos por meio dos recursos literários utilizados. Mais adiante, a pesquisa de linha dialética será mais bem explorada.

Dessa maneira, pretendo, na introdução que se seguirá, iniciando com pequenos trechos do *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano*, de Galileu Galilei, demonstrar os motivos de minha escolha por um ensino

⁵ O uso do termo *soft* retrata nossa limitação em um aprofundamento maior nas relações sociais dos alunos fora do contexto de sala de aula. Restringimo-nos, portanto, em avaliá-los enquanto alunos de sala de aula de 3º EM na disciplina de física. No capítulo 2, item 2.2, o termo *soft* aqui empregado é melhor explicado ao esclarecermos a linha dialética de pesquisa.

de física mediado pela literatura, e por uma pesquisa qualitativa com enfoque dialético. Ela permite, a meu ver, uma aproximação contextualizada e problematizada sobre a realidade em que vivem os alunos que fizeram parte do estudo desta dissertação, bem como, pelo fato da dialética permitir melhor aproximação da essência com os fenômenos estudados. Isso me possibilitou avaliar a relevância para esses alunos de estudarem física moderna e contemporânea, no final de sua trajetória escolar em nível de ensino médio, quando antes se restringia apenas a revisões de mecânica para prestarem exames de vestibular. Nesse contexto, um ensino verticalizado, nos moldes da educação bancária, denunciada por Paulo Freire, seria inócuo, pois é possível que os alunos não aceitassem essa imposição, ou que não gostassem do curso, sendo necessário um trabalho profilático de convencimento. Por outro lado, minha escolha permitiu dialogar, aproximar os alunos dos conceitos físicos e levá-los a fazerem parte do seu processo de aprendizagem, não só participando das aulas, mas inclusive, trazendo sugestões de vídeos ou filmes. E essa participação ativa foi o motor do ensino desenvolvido com esses alunos, pois ao tornarem-se partícipes do seu ensino, valorizaram mais os conteúdos ministrados, e aprovaram a metodologia empregada.

4. Estrutura dos Capítulos

Além da apresentação inicial, esta dissertação se compõe de quatro capítulos, mais as considerações finais. No primeiro capítulo, apresentarei o estado da arte sobre as relações entre a física e a literatura, onde foram pesquisados artigos em revistas e atas de simpósios/congressos sobre ensino de física e ensino de ciências a partir de 2000 ⁶.

⁶ Em geral, verifiquei que as revisões de bibliografia apresentam-se dentro de um período que varia de cinco até dez anos. Como dez anos constituiria uma revisão a partir de 2003, optei pelo início de 2000 a fim de verificar o que se produziu nesse século. Contudo, como será observado, a escassez de trabalhos publicados sobre esse tema me conduziram a avaliar outras publicações não especializadas em ensino de física, além de períodos anteriores ao escolhido.

No segundo capítulo, abordarei a pesquisa de cunho qualitativo com enfoque dialético, procurando evidenciar as características principais de uma pesquisa desse tipo, bem como os motivos que me levaram à escolha dialética de pesquisa, sua proximidade com a essência dos fenômenos; além de abordar a pseudoconcreticidade em que, não só os alunos vivem, mas todos nós, como seres inseridos na indústria cultural, em maior ou menor grau. Entender a noção dessa percepção de realidade, por parte dos alunos, é primordial para desenvolver uma pesquisa dialógica, horizontal e que respeite o aluno enquanto participante de seu aprendizado.

No terceiro capítulo irei enfocar meu referencial teórico mais importante, o interacionismo de Vygotsky, a forma e os processos pelos quais os alunos aprendem conceitos científicos, a formação de generalizações, de pseudoconceitos e da abstração, como processo mental mais elevado que conduz, ou pode conduzir à construção de conceitos científicos. Neste capítulo procurarei demonstrar como a abstração literária pode ser utilizada para a formação de pseudoconceitos que, tratados didaticamente, possam culminar em conceitos físicos genuínos a respeito da FMC e elementos de MQ.

No quarto capítulo, exponho quais foram, e de que forma se desenvolveram, as aulas sobre Física Moderna e Contemporânea, os tópicos de Mecânica Quântica abordados, as leituras utilizadas, os vídeos sugeridos pelos alunos, os utilizados em sala, e todo o processo metodológico que culminou no ensino da FMC utilizando como ferramenta a literatura.

Nas considerações finais, realizarei uma revisão dos principais aspectos teórico-metodológicos empregados, e procurarei evidenciar os resultados obtidos com esta pesquisa, suas limitações e possibilidades futuras de investigação. Discutirei também que o ensino de física dialógico por meio da literatura, onde apareçam elementos

culturais, torna-se possível quando o professor busca uma formação científica em seus alunos de forma a respeitá-los enquanto protagonistas de seu próprio aprendizado, apresentando uma nova ferramenta de ensino de física, que enfoque uma física mais humana, mais contextualizada e motivadora para os alunos.

5. Bases Teórico-Metodológicas para o enfoque dos problemas e perspectivas inerentes à utilização da literatura no ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: uma introdução

Salviati – [...] Mas vós escutareis seguramente outras novidades, e vereis esses seguidores do novo sistema formular contra si mesmos observações, experiências e razões com força muito maior que aquelas formuladas por Aristóteles e Ptolomeu, ou por outros opositores das mesmas conclusões e, desse modo, podereis certificar-vos de que não foi por ignorância ou inexperiência que foram levadas a seguir tal opinião (Salviati, respondendo a Sagredo que os seguidores de Copérnico não são ignorantes, in: MARICONDA, 2004, p.208).

Sagredo – [...] considerando, digo, essas coisas, comecei a acreditar que aquele que deixa uma opinião embebida com leite e seguida por infinitos, para adotar uma outra seguida por pouquíssimos, e negada por todas as escolas, e que parece verdadeiramente um enorme paradoxo, deveria necessariamente ter sido movido, para não dizer forçado, por razões mais eficazes. Por isso tornei-me desejoso de chegar, como se diz, ao fundo deste assunto, pelo que considero ser uma grande sorte para mim o encontro com vós ambos, dos quais eu posso sem nenhum esforço escutar tudo o que foi dito, e talvez tudo o que se pode dizer acerca dessa matéria, certo de ser, em virtude de vossos argumentos, arrancado da dúvida e colocado no estado da certeza.

Simplício – Contanto que vossa opinião e esperança não sejam frustradas e que ao final não vos encontreis mais confuso do que antes.

Sagredo – Estou certo de que isso de modo algum acontecerá.

Simplício – E por que não? Sou eu mesmo um bom testemunho de que, quanto mais progrido, mais me confundo.

Sagredo – Isso é indício de que aquelas razões que até aqui vos pareciam concludentes, e vos tinham certo da verdade de vossa opinião, começam a mudar de aspecto em vossa mente, deixando-vos lentamente, se não passar, pelo menos inclinar para a opinião contrária. Mas eu que sou, e fui até agora, indiferente, confio muitíssimo em poder chegar à tranquilidade e à segurança; e vós mesmos não me negareis isso, se quiserdes ouvir o que faz que me persuade a esperar isso.

Simplício – Escuto-vos por prazer, e não seria menos grato se operasse em mim o mesmo efeito.

Sagredo – Fazei-me, portanto, o favor de responder às minhas interrogações. E em primeiro lugar, Sr. Simplício: não estamos nós buscando concluir se se deve manter com Aristóteles e Ptolomeu que, estando apenas a Terra parada no centro do universo,

todos os corpos celestes estão em movimento; ou, pelo contrário, que, estando parada a esfera estelar e ocupando o Sol o centro, a Terra está fora do centro, sendo seus aqueles movimentos que nos parecem pertencer ao Sol e às estrelas fixas?

Simplicio – Essas são as conclusões acerca das quais se disputa.

Sagredo – Essas duas conclusões não são elas tais que, por necessidade, uma deve ser verdadeira e a outra falsa?

Simplicio – Assim é: estamos num dilema, do qual uma parte deve necessariamente ser verdadeira, e a outra falsa; porque entre o movimento e o repouso, que são contraditórios, não se dá um terceiro, de modo que se possa dizer: “a Terra não se move, e não está parada; o Sol e as estrelas não se movem, nem estão parados”.

Sagredo – A Terra, o Sol e as estrelas, o que são na natureza? São coisas mínimas, ou antes, consideráveis?

Simplicio – São corpos principalíssimos, nobilíssimos, integrantes do universo, vastíssimos, considerabilíssimos.

Sagredo – E o movimento e o repouso, quais acidentes são na natureza?

Simplicio – Tão grandes e essenciais, que a própria natureza por eles se define.

Sagredo – De modo que mover-se eternamente e estar totalmente imóvel são duas condições muito consideráveis na natureza e indicativas de enorme diferença; principalmente, quando atribuídas aos corpos principalíssimos do universo, em consequência das quais não podem acontecer senão eventos muito dessemelhantes.

Simplicio – Assim é seguramente.

Sagredo – Respondei agora sobre outro ponto. Acreditais que na dialética, na retórica, na física, na metafísica, na matemática e, finalmente, que na universalidade dos discursos, existam argumentos que têm o poder de persuadir e demonstrar a outros não menos as conclusões falsas que as verdadeiras?

Simplicio – Senhor, não; considero, pelo contrário, estabelecido e tenho certeza de que para a prova de uma conclusão verdadeira e necessária existe na natureza não somente uma, mas muitas demonstrações poderosíssimas e que, em torno dessa conclusão, se possa discurrir e girar com milhares de confrontações, sem encontrar jamais qualquer incoerência e que, quanto mais algum sofista quisesse enturvá-la, tanto mais clara ficaria sempre a sua certeza; e que, ao contrário, para que uma proposição falsa possa parecer verdadeira e para que seja persuasiva não se poderia produzir outra coisa que falácias, sofismas, paralogismos, equívocos, e argumentos vãos, inconsistentes e repletos de incoerências e contradições.

Sagredo – Ora, se o movimento eterno e o repouso eterno são acidentes tão principais na natureza e tão diferentes que deles não podem depender senão consequências diferentíssimas, principalmente quando aplicados ao Sol e à Terra, corpos tão imensos e notáveis no universo e sendo, além disso, impossível que uma das duas proposições contraditórias não seja verdadeira e a outra falsa, e não se podendo para provar a falsa produzir mais que falácias, e sendo a verdadeira persuasível por quereis que aquele entre os senhores que está determinado a sustentar a proposição verdadeira não me possa persuadir? Eu deveria ser estúpido de engenho, perturbado de juízo, inepto de mente e de intelecto, e cego aos argumentos, para que não pudesse discernir a luz das trevas, as gemas dos carvões, o verdadeiro do falso (MARICONDA, 2004, p. 210, 211 e 212).

Esse pequeno trecho, da segunda jornada do *Diálogo*, de Galileu Galilei, retrata o emprego da argumentação e da dialética, como meio pelos quais se busca fazer entender determinado objeto cognoscível, no caso em questão, o movimento da Terra, não somente através do convencimento pela argumentação, mas pela imposição de fazer o outro pensar. Constitui-se em um meio de diálogo usado por Galileu, baseado na contraposição e contradição das ideias aristotélico-ptolomaicas, que leva a outras ideias, no caso, ideias copernicanas do movimento da Terra.

Analisando o trecho acima desse diálogo, podemos perguntar por que diante de diversos métodos disponíveis, Galileu decidiu utilizar justamente a dialética para escrever sua obra?

Decerto, o *Diálogo* é uma obra de convencimento, pois Galileu procurava, entre outros objetivos, convencer os matemáticos da época de que o sistema heliocêntrico de Copérnico era mais plausível que o sistema geocêntrico ptolomaico defendido por Aristóteles e seus seguidores. Diante de tarefa tão complexa, e perigosa para a época, Galileu decide utilizar-se do poder da argumentação, da escrita e da literatura, optando por uma linha dialética entre três personagens. Um representando o conhecimento aristotélico e ptolomaico da imobilidade da Terra, de nome Simplicio; outro de nome Sagredo, representando alguém do povo e indiferente à disputa, que acolhe ambas as argumentações e que, ao longo da obra, vê-se inclinado às ideias pregadas pelo terceiro personagem, de nome Salviati, que representa o próprio Galileu em defesa do modelo copernicano de mobilidade da Terra.

Analisando com mais cuidado a descrição do diálogo supramencionado, percebemos no primeiro trecho, na fala de Salviati, que Galileu se prepara, de acordo

com Mariconda (2004, p.642), para colocar na boca do personagem Sagredo um “argumento de conversão” ao copernicanismo como ato racional. Ou seja, altamente justificado em termos de razão que, por sua persuasão, pode levar à convicção da veracidade da proposição. Mariconda (2004) alerta-nos sobre a eficácia do método utilizado por Galileu, lembrando que:

Pode-se, finalmente, ter uma ideia da eficácia de um tal argumento quando se considera que ele foi arrolado como o item 7 do corpo de delito contra Galileu, no processo de 1633: “apresentar como prova da verdade que os ptolomaicos passem aos copernicanos, e não ao contrário” (MARICONDA, 2004, p.643).

Galileu, logo em seguida, deixa a fala para Sagredo que, com o “argumento de conversão” citado acima, utiliza-se ainda do método maiêutico, consistindo-se no método que Sócrates utilizava para levar seus discípulos ou interlocutores a duvidarem de seu próprio conhecimento sobre um determinado assunto para, em seguida, leva-los, por si mesmos, a conceber uma nova ideia, ou nova opinião sobre o assunto tratado. Sobre esse importante recurso adotado por Galileu, Mariconda (2004) esclarece:

Note-se que ele (o diálogo) se inicia com Simplicio admitindo encontrar-se, de certo modo, confuso e com Sagredo considerando, à maneira socrática, que o estado de confusão é um indício de que as razões, das quais Simplicio tinha até aqui certeza, começam a mudar de aspecto. Sagredo tenta, então, por assim dizer, “arrastar” Simplicio, pelo uso da maiêutica, à admissão de que também ele está, pouco a pouco, convertendo-se à opinião copernicana e é por isso que se sente confuso (MARICONDA, 2004, p.643).

Analisando a quinta fala de Simplicio, descrita no início desta introdução, verifica-se claramente o recurso da dialética empregada por Galileu, ao tratar da contrariedade e contraditoriedade, levando Simplicio a respostas contraditórias e diferentes das apresentadas por Sagredo. Sobre esse recurso, Mariconda (2004) afirma que há:

Um descompasso entre a questão de Sagredo e a resposta de Simplicio. Com efeito, ela envolve a distinção lógica entre contrariedade e contraditoriedade. Duas proposições são contrárias entre si quando não podem ser ambas verdadeiras, embora possam ser

ambas falsas. Por outro lado, duas proposições são contraditórias entre si quando não podem ser ambas verdadeiras, nem ambas falsas, mas uma deve ser verdadeira e outra falsa. Isto posto, a alternativa proposta por Sagredo em sua fala parece ser constituída por um par de proposições contrárias, pois ele parece estar comparando o sistema copernicano como um todo ao sistema ptolomaico como um todo e, neste caso, ambos poderiam ser falsos, sendo verdadeiro um terceiro sistema, por exemplo, o sistema de Brahe, no qual a Terra está imóvel no centro e os planetas giram ao redor do Sol, enquanto este gira ao redor da Terra. Por outro lado, as proposições que Simplicio apresenta, em sua resposta à indagação de Sagredo, são de fato contraditórias, mas são diferentes das de Sagredo (MARICONDA, 2004, p.643).

Logo em seguida a essa passagem, na nona fala de Sagredo, é perguntado a Simplicio se ele acredita na dialética, na retórica e na universalidade dos discursos, como argumentos capazes de comprovar o erro ao invés da verdade. Ao que Simplicio responde que não, pois tais tentativas se constituiriam em falácias, uma vez que o emprego de discursos deveria levar à verdade e não à mentira. Ao que Sagredo encerra esse trecho recapitulando a argúcia textual usada para afirmar que seria capaz de distinguir entre um ou outro modelo.

Mostramos esses trechos do *Diálogo* de Galileu, bem como uma sucinta análise dos mesmos, para demonstrar que a leitura, assim como a literatura, podem ser utilizadas para se compreender conceitos físicos mais complexos. No caso do *Diálogo*, Galileu, por meio da literatura utilizada, busca apresentar o modelo copernicano a seus contemporâneos, o que para a época era um conceito inovador, provocativo e complexo.

Além disso, acreditamos que a literatura possa proporcionar aos estudantes uma compreensão de visões de mundos complementares a simples descrição matemática de fenômenos físicos, os quais são tão presentes na maioria dos livros didáticos, ou apostilas, e estudados em salas de aula do Ensino Médio (EM). Pode, ainda, fornecer uma formação cultural mais ampla e um acesso ao conhecimento científico de forma mais suave, compreensível e melhor aceito, ou mais “tragável” pelos alunos, onde possa

aparecer a história da física, a filosofia da ciência, suas relações com a sociedade e com a cultura, garantindo uma melhor compreensão da física enquanto atividade humana.

Uma inserção no ensino de física, nesse contexto, colabora também para uma compreensão melhor da disciplina, evitando que se confunda física com matemática, ou que os alunos sejam levados a pensar que a física é uma matemática mais elaborada. Em uma pesquisa a respeito da concepção da física por alunos de Ensino Médio, Ricardo e Freire (2007) esclarecem que para os alunos não há distinção entre física e matemática; muitos tratam indistintamente as duas disciplinas quando questionados sobre suas diferenças, como ilustrado na resposta de um aluno do 3º EM: “Nenhuma, porque tudo acaba em cálculo” (RICARDO; FREIRE, 2007, p. 255). Na pesquisa, os autores alertam para a importância da compreensão pelos professores do papel da matemática na construção do pensamento físico, ainda que a diferença entre matemática e física não seja clara, inclusive para os professores. Pietrocola (2002), também alerta para pouca compreensão dessa relação entre a física e a matemática, tratando-se esta como mera linguagem de comunicação daquela.

Tal confusão se estabelece, em parte, pela falta de abordagens histórico-filosóficas no ensino de física, bem como pela ausência de inserção de leituras gerais, textos históricos e literaturas específicas. Uma possibilidade que poderia dissolver tal confusão é a convergência entre física e literatura, que pode se dar através da história da física, onde há a influências de grandes escritores, desde o início da física clássica no século XVI, e grandes cientistas como Galileu, Kepler, Newton e Einstein (ZANETIC, 1996).

Além dessas observações, algumas perguntas podem ser realizadas, a fim de melhor compreendermos como se poderia abordar o ensino de física mediado pela

literatura, pela história e/ou pela filosofia. Ou seja, que tipos de história, de filosofia e de literatura poderiam ser contemplados no ensino de física?

Sobre esses questionamentos, Zanetic (2006), nos oferece algumas respostas:

Que história da física utilizaria? Opto por uma história que contemple tanto a evolução conceitual e metodológica da física quanto sua relação com outras áreas do conhecimento e com a sociedade de uma maneira geral, enfim a física inserida no processo histórico.

Que filosofia da ciência? Sugiro a filosofia da ciência contemporânea, principalmente a que é baseada fortemente na história, que apresenta elementos de análise que enriquecem nossa visão da ciência como instrumento de “diálogo com a natureza”. Minha opção fica restrita às epistemologias de Gaston Bachelard, Thomas Kuhn e Paul Feyerabend. Se a filosofia voltasse⁷ como disciplina no ensino médio, ficaria ainda mais fácil discutir com os alunos a ruptura epistemológica, a revolução científica, os paradigmas, a proliferação de teorias, a verdade, o método, etc.

Que literatura utilizar em aulas de ciência? Brevemente, diria que tenho em mente não apenas os grandes escritores da literatura universal que em suas obras utilizam conceitos e métodos das ciências, e da física em particular, os escritores com veia científica, como também várias obras escritas por cientistas com forte sabor literário, os cientistas com veia literária (ZANETIC, 2006, p. 43).

A aproximação entre física e literatura pode ser mediada pelos textos escritos, tanto por cientistas quanto por não cientistas. Sobre esses escritores, Zanetic (2006), ao denominá-los como escritores com veia científica e cientistas com veia literária, oferece-nos alguns exemplos, a saber, Galileu, H. G. Wells, Einstein, Infeld, Landau, Bohr, Feynman, Edgar Allan Poe, Júlio Verne, Sir Arthur Conan Doyle, Fred Hoyle, Karel Capek, Ray Bradbury, Arthur Clarke, Dante Alighieri e tantos outros. Nessa linha de utilização e articulação entre física e literatura, vale mencionar também Johannes Kepler e seu livro *Somnium*, publicado em 1634. Trata-se de um romance onde se descreve a viagem do homem à Lua, sendo considerado o primeiro livro de ficção científica da história (CHRISTIANSON, 1976). Ou Camões e sua obra *Os Lusíadas*, onde a visão geocêntrica de mundo está presente em vários versos, além das ficções de

⁷ À época desse escrito de João Zanetic, a Filosofia havia sido retirada dos currículos escolares. Atualmente, a filosofia está presente no currículo do EM. Todavia, seu retorno não significa que tenha caminhado na direção apontada acima pelo autor.

Asimov, entre outros, cujas obras podem ser utilizadas em contextos de aproximação com aspectos e elementos diversos de física.

Dentro dessas considerações, vale perguntar quão enriquecedor não seria aprender cinemática ou astronomia, só para citar um exemplo, preliminarmente, discutindo os textos históricos de Galileu. Ou, a gravitação através de escritos de Kepler. Ou, ainda, aprender dinâmica através da concepção dos *Principia* de Newton. Seria possível, por exemplo, abordar aspectos de sua vida, desconstruindo a visão de gênio, alertando sobre os riscos de mitos, como a da queda da maçã em sua cabeça que o teria feito descobrir a gravidade. Poder-se-ia demonstrar o aparecimento da aceleração na relação entre a quantidade de movimento e o tempo; $F \propto \Delta (mv)/t$, entre outros aspectos interessantes, ao invés de apresentarmos aos alunos somente o $F = m.a$, seguido de inúmeros exercícios de fixação, desconectados ou desligados de um conhecimento mais amplo.

Um ensino que focasse os aspectos histórico-filosóficos da física poderia contribuir, também, para aumentar o hábito e o gosto pela leitura, por parte dos estudantes, bem como aumentaria suas habilidades de interpretação e análise textuais, além de promover uma visão da ciência como entidade cultural. Esse conjunto de benefícios representa importantes elementos constituintes na formação dos estudantes de EM, o que pode ser possível mediante uma articulação didática entre física e literatura.

A esse respeito, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) para o Ensino Médio nos lembram de que:

A Física percebida enquanto construção histórica, como atividade social humana, emerge da cultura e leva à compreensão de que modelos explicativos não são únicos nem finais, tendo se sucedido ao longo dos tempos, como o modelo geocêntrico, substituído pelo heliocêntrico, a teoria do calórico pelo conceito de calor como energia,

ou a sucessão dos vários modelos explicativos para a luz. O surgimento de teorias físicas mantém uma relação complexa com o contexto social em que ocorreram. **Perceber essas dimensões históricas e sociais corresponde também ao reconhecimento da presença de elementos da Física em obras literárias**, peças de teatro ou obras de arte. Essa percepção do saber físico como construção humana constitui-se condição necessária, mesmo que não suficiente, para que se promova a consciência de uma responsabilidade social e ética (BRASIL, 1998, p. 27-28, grifo meu).

Uma vez que obras literárias, em geral, representam a cultura de uma sociedade, com seus aspectos sócio-históricos, e levando em conta que em nossa sociedade atual a ciência e a tecnologia estão presentes, torna-se necessário pesquisar até que ponto os aspectos presentes nas obras literárias podem contribuir para o aprendizado de física. Tais aspectos são tratados, dentro de nossa revisão bibliográfica, onde procuramos compreender como a literatura, por meio de textos, leituras, analogias, metáforas, pode fomentar a imaginação, a criatividade e colaborar para formação de conceitos em nossos alunos, como se verá mais a frente.

Considerando-se que a literatura abre a possibilidade para o leitor participar da trama que ali se apresenta, em determinado cenário histórico e filosófico, dialogando muitas vezes com o autor, despertando sentimentos de empatia, verifica-se que ela possibilita ao leitor ser protagonista de seu aprendizado por parte da leitura, imaginando os cenários, falas dos personagens e aumentando sua criatividade, possibilitando ao aluno, no caso de seu uso didático, ser mais que mero coadjuvante em seu processo de ensino e aprendizagem. Com isto, a percepção de um processo de conhecer se instaura, rompendo com o conhecimento pronto e acabado, como são apresentados nos livros textos escolares (GUERRA; MENEZES, 2009). Dentro dessa perspectiva, acreditamos ser necessária uma implementação de pesquisa que leve em consideração essa percepção de conhecimento, por parte dos alunos.

No entanto, percebemos que tal ruptura epistemológica, entre anos de conhecimento verticalizado – devemos lembrar que os alunos da escola básica estudam doze anos, desde seu ingresso no primeiro ano do fundamental I até o 3º ano do Ensino Médio (EM), decorando desde as primeiras tabuadas até a Lei de Coulomb, de forma praticamente descontextualizada e voltada à resolução de exercícios de livros - para um processo de conhecimento estruturado, dialógico e horizontal, não seja tarefa trivial de se realizar. Apesar da complexidade desse processo, pensamos que seria plausível sua realização mediante uma linha de pesquisa qualitativa e dialética.

A escolha do livro *Alice no País do Quantum*, para introdução do ensino de Física Moderna e Contemporânea (FMC) e dos elementos de Mecânica Quântica (MC) aos alunos de 3º EM, partiu de minhas leituras particulares, anteriores mesmo à pós-graduação. Entretanto, somente após a realização da minha revisão de bibliografia é que havia notado a sugestão da utilização desse livro para o ensino de FMC. Entre várias sugestões de obras literárias que possam ser utilizadas no ensino de física, Carvalho e Zanetic (2004), sugerem *Alice no País do Quantum*. Pereira e Londero (2013), também utilizaram *Alice no País do Quantum*, para ensinar física de partículas aos seus alunos, trabalhando com o Capítulo *Baile dos Massacrarados*.

Mas, a utilização desse livro, como apoio metodológico veio-me à mente quando participava das reuniões do Núcleo de Pesquisas em Inovação Curricular (NUPIC), onde um tempo depois percebi o que se entendia por contextos de inovação no ensino de física. A introdução da FMC no ensino de física da educação básica é inovador, pois, apesar das várias pesquisas a respeito dessa inserção nesse nível de ensino, ela – a FMC – ainda não está presente, ao menos não com o mesmo status da Física Clássica (FC) nas aulas de física.

Nesse contexto, percebi que também o ensino de física por meio da literatura era inovador, talvez mais ainda que a inserção da FMC, pelos mesmos motivos apresentados, pois nos livros de física, ao menos a grande maioria, não há a inserção de leituras, de textos históricos que articulem os processos histórico-filosóficos e sociais em que a física esteve e está associada. As leituras, quando existem, não passam, em sua maioria, de uma página para tentar contextualizar um período histórico/filosófico que se irá abordar através de resolução de exercícios. Praticamente inexistem leituras mais amplas que enfoquem a história e a filosofia, os contextos sociais e humanos com os quais a física, em seu desenvolvimento, esteve ligada. Por exemplo, Ramalho Junior, Nicolau e Toledo (2012), autores consagrados há anos, no seu livro *Fundamentos da Física I Mecânica*⁸, apresentam no capítulo 1, item 1, uma introdução à física em seis linhas. Não há sequer uma menção ao nome de Galileu Galilei. No item 2, 14 linhas para definir a física em sua origem etimológica grega. Assim, passam, rasteiramente, à explicação do universo constituído por átomos em mais 20 linhas, para depois explicarem a importância da matemática na física e passarem aos Algarismos significativos, operações, notação científica, ordem de grandeza, para, finalmente, apresentarem uma lista de 30 exercícios!

Esse tipo de ensino de física, que enfoca apenas a resolução de exercícios por repetição, já foi criticado nos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCN):

O ensino de Física tem-se realizado frequentemente mediante a apresentação de conceitos, leis e fórmulas, de forma desarticulada, distanciados do mundo vivido pelos alunos e professores e não só, mas também por isso, vazios de significado. Privilegia a teoria e a abstração, desde o primeiro momento, em detrimento de um desenvolvimento gradual da abstração que, pelo menos, parta da prática e de exemplos concretos. **Enfatiza a utilização de fórmulas, em situações artificiais, desvinculando a linguagem matemática que essas fórmulas representam de seu significado físico**

⁸ Cito essa coleção apenas como exemplo ilustrativo, mas outras coleções também apresentam estruturas similares.

efetivo. Insiste na solução de exercícios repetitivos, pretendendo que o aprendizado ocorra pela automatização ou memorização e não pela construção do conhecimento através das competências adquiridas (BRASIL, 1998, p. 22, grifo meu).

A crítica lançada pelos PCN há 16 anos ainda é atual. A gravidade dessa desarticulação entre conceitos, leis e fórmulas, gera, entre outros, um repúdio pelo estudo da física, pela maioria dos estudantes de EM. Não é de se estranhar que os alunos de EM, quando interpelados sobre qual matéria menos gostam, a física esteja entre as primeiras.

Verifica-se, inclusive, que a maioria dos alunos não gosta de física justamente por causa da desarticulação e incompreensão, como já citado por Ricardo e Freire (2007), entre os conceitos físicos e os cálculos matemáticos. D'Agostin et al. (2006) verificaram, inclusive, que alunos de 3º EM, sentem uma aversão maior à física, do que os do 1º EM, pois foram os anos estudando física que, justamente, criaram a aversão à disciplina, (D'AGOSTIN, et al., 2006).

Tal verificação denota que os alunos, em seu primeiro contato com a física possuem certa expectativa, muitos têm curiosidades, das mais diversas sobre as ciências em geral, e em especial sobre a física, que poderiam facilmente ser respondidas por meio de uma articulação entre física e literatura e ficção científica. Mas, acabam sendo podados em seus anseios, expectativas e curiosidades, pois logo se veem obrigados à realização de repetições maçantes de exercícios descontextualizados.

Há necessidade de uma mudança metodológica no ensino de física, que promova uma forma mais atraente e prazerosa. Nesse contexto, Nory e Zanetic (2005), propõe um ensino de física atraente aos alunos e critica o ensino de física praticado nas salas de aula:

O ensino de Física dominante em nossas escolas ainda é algo totalmente distante de todas as propostas inovadoras produzidas pela área de pesquisa em ensino de física, bem como das recomendações que constam dos PCN, e totalmente desacoplado da realidade. O que é que o aluno encontra duas ou três vezes por semana na sala de aula de Física tradicional? Sempre a mesma coisa: $F = ma$, $Q = mc\Delta T$, $F = q.v.B \sin\theta$, que sofre uma leve variação no ensino superior, ficando $F = q \times v \times B$. É este o tipo de ensino que promove o alcance dos objetivos dos PCN? Temos certeza que não. Não queremos aqui, porém, pregar que a parte matemática dos cursos de Física deva ser abolida. Quero dizer apenas que deve ser complementada (NORY; ZANETIC, 2005, p. 02).

Constata-se, também, que apesar das críticas e recomendações propostas pelos PCN, além de pesquisas sobre ensino de física, efetivamente, pouca coisa tem mudado na realidade do ensino de física nas salas de aula de EM.

Os livros didáticos de física continuam baseados na repetição de exercícios e não levam em consideração textos ou enfoques histórico-filosóficos, ou articulações com os contextos nos quais os conceitos físicos foram criados⁹. Simplesmente aparecem postos, como evidenciado pela fala de um autor de livro didático de física sobre um conteúdo específico de mecânica, que trata do Princípio Fundamental da Dinâmica (PFD):

(...) podemos escrever a expressão matemática da segunda lei de Newton na forma:

$$\overrightarrow{F_R} = m\vec{a}$$

Não há necessidade de enunciar em palavras a segunda lei de Newton; basta a sua expressão matemática (Gaspar, 2010).

Tal absurdo só tem sentido se o objetivo em questão é o de aprender apenas a decorar fórmulas e resolver exercícios. Se o propósito de livros didáticos desse tipo é o de servir aos alunos conteúdos que são cobrados nos vestibulares, ou prepará-los e adequá-los ao formato de provas seletivas e excludentes, então, cumprem seu papel.

⁹ De certo, algumas tentativas de mudança desse cenário ocorrem, como o incentivo dado pelo Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLEM), ao selecionar livros, contudo, as aulas verticalizadas centradas em conteúdos e formatadas nos moldes de cobrança em vestibulares ainda é uma realidade, principalmente no cenário de escolas particulares, como é o caso dos alunos participantes dessa pesquisa. É sobre essa realidade que apontamos a falta de mudanças, pois ainda se vê um mercado regulador do ensino, cujas demandas atendem, na maioria, somente um mercado de exames vestibulares, como descrito por Ricardo (2004, p. 71), e os livros e/ou apostilamentos que atendem a essa demanda não apresentam mudanças relevantes, como denunciado e criticado por Nory e Zanetic (2005).

Entretanto, esse tipo de ensino de física não cumpre um requisito importante: garantir aos alunos a compreensão da física como agente transformador da sociedade, da história e do próprio homem, como transformadora de visões de mundo e quebra de paradigmas ao longo da história, possibilitando ampliações sobre a forma como se pensa o universo e a própria vida.

O historiador Eric Hobsbawn (1995), destacou as mudanças de paradigmas promovidas pela física e a forma como a sociedade, a história, a filosofia, e o próprio ser humano, mudaram depois do advento da Física Moderna. Logo no início de seu capítulo XVIII, citando Lévi-Strauss, pergunta-se:

Você acha que há lugar para a filosofia no mundo de hoje?
Claro, mas só se for baseada no atual estado de conhecimento e realização científicos. [...] Os filósofos não podem isolar-se contra a ciência. Ela não apenas ampliou enormemente nossa visão da vida e do universo: também revolucionou as regras segundo as quais opera o intelecto (LÉVI-STRAUSS, In: HOBBSAWN, 1995, p. 504).

Visões de ciência prontas e acabadas, em forma de simples expressões matemáticas, como as apresentadas nos livros didáticos, não conseguem garantir essa compreensão no aprendizado dos alunos. Caberia, então, à escola, o papel de formação para autonomia, para um tipo de aprendizado que garanta ao aluno a compreensão de conteúdos contextualizados em seu aspecto, também, histórico-filosófico-social. Isso permitiria a esses alunos conhecerem uma física que vai além da repetição de exercícios, capacitando-os a pensar de forma consciente sobre aspectos científicos, como cidadãos críticos de uma sociedade.

Nesse sentido, o papel da escola seria de extrema importância, como nos lembra Ricardo (2004), ao nos alertar sobre esse papel e apontar para a existência de um mercado regulador do ensino, cujas demandas atendem, muitas vezes, somente as relações de produção estabelecidas:

...se é verdade que a escola tem papel fundamental na constituição da sociedade, então essa escola terá que deixar de ser mero cenário burocrático na vida dos alunos e passar a ser um ambiente de formação para a autonomia, para se buscar saídas, **e não para formatá-los de acordo com o mercado** (RICARDO, 2004, p.171, grifo meu).

Justamente nessa perspectiva, temos que considerar o EM como um lugar privilegiado, por trabalhar com alunos em formação básica, onde podemos inserir aspectos do ensino da física relacionados com outros contextos culturais, abordar conceitos físicos que englobem seu aspecto social, histórico, filosófico e humano de criação, e não resumir todo esse contexto de formação a meras expressões matemáticas. Em vez disso, deveríamos oferecer ferramentas diversas de interpretação da realidade, onde possam compreender os fenômenos físicos como pertencentes a um contexto também cultural. A questão que se coloca é estabelecer qual tipo de física se quer ensinar aos alunos de EM.

Uma vez que se pense em um ensino de física voltado a uma compreensão dos conceitos, que leve em conta os processos históricos, filosóficos, sociais, humanos e culturais que deles fazem parte, e não somente como um produto acabado, como apresentado no ensino de física atual, faz-se necessário iniciar uma mudança no processo de ensino e aprendizagem em física, como sinalizado por Guerra et al. (1998). A autora e seus colaboradores propõem uma mudança na “*visão conteudista e exageradamente matemática que impera no ensino*” (p. 38), elaborando uma nova abordagem, sem anular completamente a linguagem matemática necessária ao entendimento e aplicação dos conceitos físicos estudados.

De acordo com Guerra et al. (1998), se formos levar em conta apenas os manuais e livros de física a resposta é que se deve ensinar o formalismo matemático. Os outros contextos nos quais os conceitos físicos foram criados não são relevantes, como ressaltam os autores:

A realidade hoje para a Ciência nada mais é do que um conjunto de equações e leis que descrevem os fenômenos. Sendo assim, o que os estudantes deveriam conhecer de Biologia, Física, Química, etc? Para responder a esta questão tomemos como exemplo a Física. Os manuais dos cursos de Física de segundo e terceiro graus têm demonstrado que a resposta a esta pergunta é bem clara. Os alunos devem conhecer o formalismo matemático da Física que, de uma forma geral, é a própria Física. O contexto histórico-filosófico em que os conceitos foram elaborados nunca é discutido. Apresenta-se ao aluno um conjunto de verdades bem encadeadas sobre a Natureza e espera-se que ele utilize este saber de forma prática. Diante deste utilitarismo dos manuais, parece anacrônico falar em historiar a Física, já que hoje o seu corpo de conhecimentos não precisa de justificativas para ser aceito. O que se faz no ensino de Física é reproduzir na sala de aula a realidade árida dos "papers", que só aos iniciados no formalismo matemático é permitido o acesso. Aqui não estamos nos referindo à pesquisa em ensino de Física, visto que, infelizmente poucos resultados têm chegado à sala de aula. No entanto, poderíamos nos perguntar: será isso correto? Servirá este tipo de ensino aos alunos? **Que valor terá o domínio de um grande formalismo matemático para a compreensão do mundo cotidiano** (GUERRA, et al., 1998, p. 41, grifo meu)?

Entretanto, não se pode afirmar que o formalismo matemático seja totalmente conhecido pelo aluno de EM, constatando-se, também, uma falta de preparo para lidar com essa linguagem na física. De acordo com Pietrocola (2002): *“se a matemática é a linguagem que permite ao cientista estruturar seu pensamento para aprender o mundo, o ensino da ciência deve propiciar meios para que os estudantes adquiram esta habilidade”* (p. 110).

A proposta presente nesta dissertação é justamente oferecer um ensino alternativo a essa realidade, por meio da inserção da literatura no ensino de FMC e MQ a alunos de 3º ano de EM, a fim de que possam ter acesso a esses saberes, mediados por outras formas de interpretação cultural.

6. O Problema de Pesquisa e os Objetivos

De acordo com as considerações elencadas até o momento e os problemas apresentados, verifica-se a necessidade de um ensino de física que possa proporcionar aos alunos um aprendizado mediado por outras formas de expressão além da matemática. Há falta e, portanto, necessidade de um aprendizado de física relacionado a

elementos culturais, em especial pela literatura, onde possam aparecer contextos histórico-filosófico-sociais dos conceitos físicos apresentados. Para isso, sugerimos uma delimitação do problema entre física e literatura com enfoque dialético, onde a abstração literária¹⁰ seja utilizada como facilitadora na construção de conceitos físicos a respeito da FMC e MQ com alunos de 3º ano de EM.

Assim, o problema geral desta pesquisa pode ser sintetizado da seguinte forma:

Quais são os aspectos presentes na literatura, na leitura de textos, no uso de metáforas e analogias, na abstração literária, e suas relações com o processo de desenvolvimento e formação de conceitos físicos, que poderiam contribuir para a construção de conceitos físicos sobre FMC e MQ por alunos de 3º ano de Ensino Médio?

O objetivo geral desta dissertação é o de estudar como a leitura, por meio da abstração literária, pode contribuir para construir nos alunos habilidades para lidar com a abstração presente nos conceitos da FMC e MQ.

Os objetivos específicos são:

- i. Aplicar e analisar uma metodologia de ensino sobre FMC, em especial sobre MQ, por meio das narrativas presentes no livro de Robert Gilmore, *Alice no País do Quantum*, que permita a construção de conceitos físicos;
- ii. Possibilitar uma aprendizagem com significado para os alunos, buscando a superação do senso comum e a construção de um conhecimento científico;

¹⁰ A abstração literária aqui citada representa a operação por meio da qual a nossa mente, depois de distinguir os caracteres essenciais de um grupo de caracteres semióticos existentes nas leituras, tais como descrições de cenários, falas de personagens, narrativas, ilustrações, entre outros, separa-os das propriedades secundárias para generalizá-los, conforme descreve Khlyabich (1967, p.99), instaurando-se determinado aprendizado. Assim, buscamos com a abstração literária construir o aprendizado de física sobre MQ por meio da generalização da leitura realizada em conceitos físicos apropriados.

- iii. Desenvolver um ensino de física sobre MQ baseado na aprendizagem problematizadora dialógica horizontal, a fim de garantir uma satisfação por parte dos alunos no estudo da física;
- iv. Verificar o surgimento de pseudoconceitos físicos por meio da literatura, bem como a forma como esses pseudoconceitos se transformam em conceitos físicos apropriados, baseando-se no referencial teórico do interacionismo de Vygotsky;
- v. Avaliar a proposta deste trabalho, observando como os alunos abstraem a leitura dos contos literários e como, a partir dessas abstrações, emergem as abstrações dos conceitos físicos sobre FMC.

7. Conjectura sobre os Referenciais Teórico-Metodológicos Gerais

Dado o problema de pesquisa desta dissertação, bem como a escassez de trabalhos, como se verá no estado da arte apresentado no capítulo I, a respeito de pesquisas e trabalhos que foquem as relações/dificuldades/propostas entre física e literatura, além da falta de estudos que abordassem e aprofundassem o papel da abstração na construção de conceitos científicos, pareceu-nos mais prudente abordar nosso problema como uma pesquisa qualitativa etnográfica. Mais especificamente, optamos por uma de suas denominações conhecida como pesquisa-ação (BARBIER, 1985), com enfoque crítico-participativo, na linha do materialismo dialético, por perceber que essa escolha nos fornecerá uma dialética da realidade (contexto) em que vivem os alunos participantes do estudo. A opção em se adotar a pesquisa qualitativa etnográfica se deve, como descrito por Triviños (1987); Lüdke e André (1986), pelo fato de considerar relevante a descrição dos fenômenos estudados (seu contexto) e seus significados culturais pelo grupo composto pelo professor (pesquisador) e pelos alunos

participes do estudo. Conforme aponta Triviños (1987), trata-se de “*conhecer (através de percepções, reflexões e intuições) a realidade para transformá-la em processos contextuais e dinâmicos complexos*” (p. 117).

O materialismo dialético permite, por sua vez, uma concepção dialética da realidade natural, social e do pensamento, possibilitando uma análise da materialidade dos fenômenos, deixando claro que esses fenômenos são possíveis de se conhecer. Ou seja, os fenômenos estudados existem em uma realidade objetiva fora da consciência, sendo a matéria o princípio primeiro e a consciência é derivada da matéria (TRIVIÑOS, 1987). Nesse sentido, o materialismo dialético é totalmente contrário ao idealismo subjetivo, para o qual a realidade parte do sujeito.

Nesse contexto, torna-se indispensável fazer alguns esclarecimentos importantes. O primeiro é que a pesquisa qualitativa não é estanque, não possui a mesma sequência rígida de uma pesquisa quantitativa. Em segundo, ressaltamos que a estrutura do texto, a forma como se apresenta, no formato dialético, busca constantemente um diálogo com as ideias apresentadas. E, em cada capítulo, as informações coletadas são interpretadas em um processo de construção dialógico e horizontal, o que permite pequenos fechamentos sobre as mesmas ao longo do texto, ao invés de aparecerem apenas na forma de conclusão final. Essa opção de dialogar com as informações que vão surgindo ao longo do texto de forma a constituir pequenas conclusões é apoiada em Triviños (1987), ao salientar que:

O denominado “relatório final” da pesquisa quantitativa naturalmente que existe na pesquisa qualitativa, mas ele vai se constituindo através do desenvolvimento de todo o estudo e não é exclusivamente resultado de uma análise última dos dados (TRIVIÑOS, 1987, p. 131).

Para escolha do referencial teórico levou-se em consideração o alerta de Triviños (1987), ao afirmar que uma grande mistura de autores e obras demonstra profunda

desorientação teórica. Entretanto, ainda de acordo com Triviños (1987): “*a abrangência da revisão da literatura depende muito da teoria que se desenvolve no esclarecimento dos fatos que se estudam*” (p. 100).

Assim, não excluindo outras possibilidades de obras ou autores, o principal referencial teórico adotado será a visão interacionista de Lev Vygotsky, em especial sua pesquisa a respeito da formação de conceitos científicos, presente em seu livro *Pensamento e Linguagem* (VYGOTSKY, 2008).

Tal escolha nos parece estabelecer uma boa compreensão das etapas que levam aos conceitos científicos e sua formação, através da abstração das leituras usadas na sala de aula com os alunos de 3º ano do EM.

A formação de conceitos se constitui em um problema central da Psicologia, sendo, também, um dos mais importantes para o ensino de Física. Vygotsky foi um pesquisador impar por ter estudado e desenvolvido esse tema na primeira metade do século XX.

Em seu livro *Pensamento e Linguagem* (2008), Vygotsky aprofunda-se, juntamente com seus colaboradores, nos caminhos que levam a formação de conceitos nas crianças, da maneira como generalizações se transformam em pseudoconceitos e como esses, através da abstração, conduzem à formação de conceitos científicos.

A fim de se buscar a consolidação dessas variáveis, foram trabalhados com os alunos não só os três capítulos do livro *Alice no País do Quantum*, constante no anexo I, mas outros textos que se mostraram pertinentes, bem como a introdução de vídeos e filmes para consolidar, por meio visual, os conceitos abstraídos das leituras realizadas. Utilizamos, por exemplo, o capítulo XVIII da *Era dos Extremos - Feiticeiros e Aprendiz* - de Hobsbawn (1995), constante no anexo II.

Trabalhamos também com mostra de vídeos disponíveis no Youtube sobre a dupla fenda de Young; dualidade da luz; hipótese de De Broglie; trechos da série The Big Bang Theory sobre o Gato de Schrödinger; slides com conteúdos sobre FMC, simuladores Java do Phet Colorado e filmes como O Discreto Charme das Partículas Elementares – TV Cultura; Quem Somos Nós e trechos do filme Um Homem Sério.

Alguns desses recursos foram sugestões/solicitações feitas pelos próprios alunos, como a solicitação de slides para melhor compreenderem o assunto lido e a sugestão do filme Quem Somos Nós.

Essa participação ativa dos alunos, em seu processo de aprendizagem, era esperada em uma abordagem dialógica e dialética, promovendo um espírito de cooperação¹¹.

Essa cooperação permite promover, inclusive, um ensino com maior significado para os alunos, o que se mostra pelos resultados, que apontam para uma boa compreensão, tanto da proposta quanto dos conteúdos abordados. Os alunos aprovaram a “ponte” construída entre física e literatura. Conseguiram entender suas limitações quanto ao uso de analogias, ou seja, compreenderam que o conceito não é a analogia em si, que esta é apenas um recurso que possibilita compreender concretamente o objeto de estudo. Além disso, demonstraram um prazer maior em estudar física, quando se compara essa metodologia com a metodologia tradicional dos livros e/ou apostilas didáticas tradicionais.

¹¹ A cooperação parece ser um atributo cada vez mais difícil de ser verificada na sociedade atual, altamente competitiva, onde se promovem rankings e os primeiros lugares são os mais valorizados, quando não, os únicos a serem levados em consideração. No livro *Juntos* de Richard Sennett, há uma rica exploração de como as pessoas podem aprender a cooperar nas culturas intensamente competitivas e egoístas.

A partir dos propósitos estabelecidos até o momento, faz-se necessário aprofundarmos o conhecimento sobre os elementos existentes em uma obra literária, como esses podem contribuir para o surgimento de pseudoconceitos que, tratados didaticamente venham a se consolidar em conceitos físicos adequados. Para tanto, iremos, no primeiro capítulo, apresentar os estudos existentes na literatura da área de ensino de física, a fim de demonstrar o que existe de pesquisas nessa área que justifiquem a intermediação entre física e literatura por meio de nossa fundamentação teórica do estudo.

1. CAPÍTULO I

Neste capítulo apresentarei o estado da arte a respeito da aproximação entre física e literatura, compreendendo o período que vai de 2000 a 2013. A escolha dessa temporaneidade, configurou-se na intenção de se verificar o que foi produzido sobre o tema física e literatura, ao longo desse século, além dos trabalhos sobre a inserção da FMC e, em especial, sobre MQ no EM.

O critério de busca foi baseado nos títulos e nos resumos. Assim, buscou-se encontrar trabalhos que tratassem de abstração científica, física e literatura, textos no ensino de física ou ciências, uso de analogias ou metáforas no ensino de física ou ciências, divulgação científica no ensino de física ou ciências, além de trabalhos que tratassem da introdução da Física Moderna e Contemporânea, em especial, da Mecânica Quântica no Ensino Médio. Aspectos e textos oficiais sobre ensino de física também foram pesquisados.

A Revista Brasileira de Ensino de Física, o Caderno Brasileiro de Ensino de Física, a Revista Ciência e Educação, a Revista Investigações em Ensino de Ciências, a Revista Eletrônica *Enseñanza de Las Ciencias* foram os periódicos consultados. Pesquisamos também as Atas do EPEF, SNEF e ENPEC, além de outras revistas não especializadas em ensino de física, que porventura apresentassem artigos sobre o tema.

Surpreendentemente, em nenhuma das Revistas ou Atas pesquisadas foi encontrado algum trabalho que tratasse especificamente da abstração de conceitos físicos. Em nenhuma das revistas especializadas em ensino de física foi encontrado algum trabalho que tratasse especificamente sobre Física e Literatura, sendo encontrados apenas em outras Revistas e nas Atas de encontros/congressos. A escassez sobre o ensino de MQ no EM também foi verificada.

Em geral, as Revistas e Atas, específicas sobre ensino de física, apresentaram alguns trabalhos sobre a inserção de textos, de leitura, de divulgação científica ou de ficção científica e do uso de analogias, o que, a nosso ver, aproximam-se do uso da literatura no ensino. Esses trabalhos também foram incluídos em nossa revisão.

1.1 A FÍSICA E A LITERATURA

Quais seriam os elementos pertencentes, tanto à física quanto à literatura, que permitiriam um ensino articulado entre as duas disciplinas, aparentemente, tão distintas uma da outra?

Uma possível resposta a essa indagação pode ser especulada, inicialmente, mediante a definição do que é literatura. O termo literatura provem do latim *littera* que significa “letra”. Entretanto, a literatura não se apresenta apenas no aspecto escrito. Ou seja, não é apenas o fato de estar escrito que se considera um texto uma literatura, o que torna complexa a busca de uma definição para o termo, que pode, também, representar todo um corpo ou um conjunto escolhido de textos, tais como a literatura médica, a literatura inglesa, a literatura portuguesa, a literatura científica, filosófica, histórica etc.

Existe, também, na literatura uma preocupação com a estética, a forma com que se escreve o texto pertencente a determinado conjunto literário. Na física, a estética também está presente no formalismo matemático, na forma de apresentação de um problema e na sua solução, e até mesmo nos nomes das teorias, portanto, há beleza envolvida, tanto em um texto bem escrito, quanto em um conceito físico bem elaborado.

Outra forma de se procurar entender a literatura é considerando-a como uma arte, como descrita por Coutinho (1978):

A Literatura, como toda arte, é uma transfiguração do real, é a realidade recriada através do espírito do artista e retransmitida através da língua para as formas, que são os

gêneros, e com os quais ela toma corpo e nova realidade. Passa, então, a viver outra vida, autônoma, independente do autor e da experiência de realidade de onde proveio (COUTINHO, 1978, p. 9-10).

E, vale lembrar, também, da distinção entre literatura e estudo da literatura. De acordo com a *Teoria da Literatura* de Wellek e Warren (1962), existe uma distinção bem nítida entre literatura e estudo da literatura, constituindo-se em duas atividades bem distintas. Enquanto a literatura é criadora, uma arte; o estudo da literatura, embora não possa ser considerada precisamente como uma ciência, encontra-se como uma modalidade do conhecer ou do aprender (ZILBERMAN, 2012, p.22).

A literatura, portanto, será considerada por nós como arte e criação, que suscita experiência. Iremos nos reter, basicamente, no seu aspecto escrito, embora saibamos que extrapola a simples escrita. Já o estudo da literatura, enquanto modalidade de conhecimento, não nos interessa para os fins que pretendemos, ou seja, o estudo da literatura fugiria aos objetivos dessa dissertação.

Assim sendo, não se pretende explorar o estudo da literatura, mas somente, esses elementos-chave, que iremos demonstrar existirem, que possibilitam a articulação entre estas duas culturas: a física e a literatura. Importa que compreendamos que tanto para a física, quanto para a literatura, existe um momento de arte e de criação, onde tanto o cientista, quanto o literário, encontram-se em um mesmo “limbo” de imaginação. A diferença surge depois, principalmente, entre os métodos utilizados, tanto por um quanto por outro. Entretanto, um mesmo amálgama parece existir entre a física e a literatura. Sobre essa relação, Mecke (2004) afirma que:

A literatura e a física habitam o mesmo ambiente cultural. Não só a física influencia a literatura como vice-versa. Não no sentido de uma causalidade direta, mas sim no de um quadro interpretativo comum, de uma língua comum, de imagens e metáforas comuns. Porque a física vive de metáforas poderosas (MECKE, 2004, p. 04).

Verifica-se nessa passagem que existe um amálgama de criação, entre física e literatura, no que diz respeito a sua interpretação, por uma linguagem comum de criação e arte, interpretada pelas imagens e metáforas que pertencem tanto a uma cultura quanto à outra. Tendo em vista, que não se pode considerar como posto e, inteligível, por definição, o amálgama mencionado, iremos nos aprofundar nessa relação, a fim de que seja melhor compreendida.

Ainda, de acordo com Mecke (2004), os conceitos e metáforas físicos são encontrados em muitos discursos e textos, sendo que, em quase todos os livros, podemos encontrar expressões físicas. O autor nos recorda de algumas, mais utilizadas:

- i. Magnético – no sentido de uma atração sinistra e animal, frequentemente significando amor;
- ii. Salto quântico – no sentido de uma mudança superlativa;
- iii. Sinergia – no sentido de um misterioso fenômeno cooperativo (MECKE, 2004, p. 6).

Conceitos físicos, como os apontados acima, também estão presentes no jargão jornalístico. A importância dessa presença se dá pelo uso de metáforas, como ferramentas que possibilitam a transposição entre um conhecimento concreto e um conhecimento abstrato (KINOCHI, et al., 2012). O uso do termo “metáforas” no sentido cognitivo, e não no sentido comumente conhecido, o linguístico, respalda-se na teoria cognitiva de Lakoff e Johnson (1980), na qual a essência da metáfora é *“compreender e experimentar um tipo de coisa em termos de outra”*, um mapeamento entre um domínio fonte concreto e um domínio alvo abstrato (LAKOFF; JOHNSON, 1980; LAKOFF; NÚÑEZ, 2000). Assim, podemos relacionar a leitura de um texto literário como um domínio fonte concreto, enquanto esperamos que, dessa leitura, surjam elementos que levem a um domínio alvo abstrato, ou seja, um conceito físico.

Certamente, há uma “licença científica”, utilizada pelos escritores para representarem suas ideias, contudo, existem, também, expressões físicas utilizadas conscientemente. Sobre essas expressões, Mecke (2004) nos recorda autores como Thomas Mann, Alfred Döblin e Umberto Eco, nos quais as expressões físicas tornam-se elemento de estilo:

Uma função literária central da fórmula parece simbolizar a violência na edição que possuo de "Berlin Alexanderplatz" ilustrada por Georg Grosz. A fórmula torna-se metáfora para a violência, para o calculismo desumano, para a morte e para a fria mecânica - para o golpe de força. Tal encontra-se não só em Döblin como também em Thomas Pynchon, que, no seu romance "Gravity's Rainbow", descreve a queda de mísseis em Londres usando a fórmula de Poisson. Recorde-se também "O Pêndulo de Foucault", de Umberto Eco, onde a fórmula do pêndulo caracteriza o estrangulamento de um ser humano. Passo a citar: "O período de oscilação, T , é independente da massa do corpo suspenso (igualdade de todos os homens perante Deus)...". Também aqui a fórmula constitui uma referência irônica à marginalização do sujeito, reduzido à "massa inerte" suspensa (MECKE, 2004, p. 6-7).

Verifica-se que a física e a literatura podem se traduzir, como indicado por Mecke (2004), em modelo e metáfora, respectivamente, levando-se em consideração que, tanto a física quanto a literatura, são formas de interpretar o mundo. Na física há a interpretação abstrata e matemática dos modelos físicos, enquanto na literatura há a compreensão pela linguagem metafórica. Vale questionar se modelo e metáfora não seriam sinônimos, sendo a distinção dada pelas formas de interpretar, tanto um quanto o outro. O alerta de Mecke (2004) nos oferece uma resposta a essa indagação: “*Na rotina do nosso cotidiano de físicos esquecemo-nos frequentemente de que são as metáforas, e não as fórmulas, que constituem a espinha dorsal do pensamento*” (Idem, p.11).

A esse respeito, vale a pena descrever as cinco teses propostas por Mecke (2004), que apontam para a possibilidade de relação entre física e literatura:

1. Metáforas físicas: Muitos livros de física pecam no que toca ao significado da linguagem e ao uso correto de imagens e metáforas. Sucede também frequentemente que os físicos se servem de termos mal escolhidos, os quais despertam nos seus ouvintes associações enganadoras. É disto exemplo a metáfora "encurvamento dos raios

de luz", já que a luz se propaga ao longo de geodésicas, que não estão encurvadas na geometria curva do espaço-tempo. Quer-se exprimir que a luz se propaga em linha reta num espaço curvo. A metáfora "encurvamento dos raios de luz" transmite, porém, uma imagem clássica da deformação de uma trajetória por ação da gravidade. [...] **Esta parece ser uma das razões pelas quais muitos estudantes são perfeitamente capazes de efetuar cálculos, mas têm ideias e imagens mentais erradas.** É indispensável ensinar não só técnicas de cálculo corretas, mas também associações de ideias corretas.

2. Os físicos como personagens literárias: **As narrativas e a literatura tornam a física interessante e emocionante.** Contribuem, portanto, para motivar e para tornar a disciplina mais atraente. [...]. A ciência não acontece numa torre de marfim, mas sim no seio da sociedade. Numa aula é possível refletir, através de exemplos tirados da literatura, sobre a visão que a sociedade tem do físico e da investigação e que valor lhes atribui. Esta sensibilização é indispensável ao nosso próprio conhecimento como físicos e ao nosso confronto crítico com a disciplina a que nos dedicamos.
3. Física e sociedade: A responsabilidade do físico não se esgota na averiguação da legitimidade em colaborar ou não com a indústria de armamento. A física pode também contribuir para desenvolver uma ética da verdade e dos valores humanos. [...] **A responsabilidade do físico reflete-se ainda na sua abertura ao diálogo interdisciplinar para que não seja deixada às ciências humanas a tarefa de compensar a perda de sentido da nossa imagem do mundo.**
4. A literatura na mudança da física: Tem-se salientado pouco o significado cultural da física, tanto junto dos estudantes como do público em geral. A física não só é fonte de tecnologia como propõe maneiras de ver o mundo, que, por sua vez, vão influenciar obras literárias. **A física é parte integrante da nossa cultura. Por que não usar a história da literatura para explicar a história da física? Penso que, nesta linha, se poderiam desenvolver módulos didáticos muito ricos para as aulas de física.**
5. Todas as ciências têm de ser poetizadas: [...] Seria desejável que os físicos adquirissem, a par da sua capacidade de usar corretamente as fórmulas, também competência a manusear as metáforas que lhes permitissem lidar corretamente com a linguagem (MECKE, 2004, p.11, grifos meus).

Além dessas teses propostas acima, vale lembrar que também há a relação da física e da literatura com a imaginação, pois tanto o escritor, quanto o físico, necessitam de imaginação na elaboração de seus escritos, sejam literários ou científicos. As relações entre física e imaginação podem ser encontradas em alguns estudos, como os de Carvalho e Zanetic (2004; 2005); Gurgel e Pietrocola (2008; 2011); Watanabe e Gurgel (2011) e Paula e Borgens (2008).

A respeito dessas relações, verifica-se que a imaginação, quando trabalhada didaticamente por meio da literatura, pode ser considerada como a ponte que conecta

uma aprendizagem não conceitual em conceitual, ou entre um conhecimento não científico em científico. Ou, ainda, entre a formação de um pseudoconceito e um conceito científico, podendo se constituir em boa estratégia de ensino. Ao ler, o estudante cria, abstrai e imagina os eventos descritos na sua leitura. Quando essa leitura se refere a livros ou textos que contenham conteúdos específicos de física, através de sua interpretação, em sua mente, são criados pseudoconceitos que tratados didaticamente podem se converter nos conceitos físicos pretendidos.

Gurgel e Pietrocola (2011), ao estudarem o processo da imaginação em um enfoque histórico-epistemológico, consideraram a imaginação como função do pensamento que busca apreender o real. Como referencial teórico, foi utilizado um resgate histórico da forma de pensar de Albert Einstein, no qual aparece a valorização da subjetividade do pensamento não conceitual, denominado como imaginação. Inclusive, os autores alertam para o fato de que o imaginário dos alunos é pouco explorado:

A criação individual reside muito mais em uma apreensão subjetiva da realidade do que a busca de uma representação da mesma. Neste sentido podemos considerar que **estratégias que valorizem e explorem essa forma subjetiva de percepção possam ter algum papel prévio na busca de uma formalização conceitual de certas ideias.** O que notamos é que o imaginário dos alunos é muito pouco explorado quando conduzimos nossas aulas em classes de ciências. **A limitação às operações formais não nos possibilita a compreensão da realidade na qual uma formulação se refere.** Neste sentido práticas que valorizem a criação de regras, como determinados tipos de jogos matemáticos permitem, podem se configurar como boas estratégias de ensino (GURGEL; PIETROCOLA, 2011, p. 12, grifos meus).

Como já discutido acima, a literatura também é representativa da arte. A física também possui aspectos, não só ligados à imaginação, mas, também, associados à arte, como defendido por Zanetic (2006). Ao estabelecer uma ponte entre essas duas culturas, o autor promove uma aproximação da física com diversas representações culturais,

como a música, a história, a filosofia, a literatura, a divulgação científica, o teatro e as artes plásticas.

Ao que parece, a primeira tentativa de se aproximar a cultura científica e a cultura humanística foi elaborada pelo físico e romancista inglês Charles Percy Snow, que criou e cunhou a expressão “duas culturas” para retratar as diversidades entre cientistas e não cientistas. Conforme Snow (1995), os humanistas não conhecem conceitos básicos da ciência e os cientistas não tomam conhecimento das dimensões humanas que a ciência carrega. De acordo com o autor: *“quando esses dois sentidos se desenvolvem separados, nenhuma sociedade é capaz de pensar com sabedoria”* (SNOW, 1995, p.72).

A denúncia da dicotomia existente entre as duas culturas, a científica e a humanística, não é exclusividade da obra de Snow (1995). Segundo Rezende, Ostermann e Ferraz (2009), ao realizarem uma introspecção no estado da arte referente ao ensino de física nacional, nos anos de 2000 a 2007, apontam para estudos basicamente realizados sobre os aspectos cognitivos do ensino-aprendizagem, apoiados em apenas três eixos:

- i. Desenvolvimento de experimentos para laboratórios didáticos;
- ii. Propostas de metodologias;
- iii. Estratégias de ensino e elaboração de recursos didáticos.

As autoras constataam, ainda, que há necessidade de pesquisas teóricas que levem à produção de conhecimento. Em uma tabela, é apresentada uma classificação dos trabalhos realizados conforme diferentes temáticas, sendo que a temática classificada como arte, cultura e educação científica trazem 0 (zero) pesquisas realizadas no período avaliado pelas autoras (REZENDE; OSTERMANN; FERRAZ, 2009, p.3).

No Brasil, ao que parece, a primeira obra que busca aproximar a física de uma dimensão cultural, é a tese de doutorado de Zanetic (1989). Nesse trabalho, o autor esclarece que o ensino de física, ou de qualquer outra área do conhecimento, ao ser ensinado por uma única perspectiva, como a do formalismo matemático, mediante a mera resolução de problemas, gera um risco grande de não estabelecer uma compreensão por parte dos alunos, sendo que o conhecimento físico deve ser considerado, também, como uma construção humana:

É claro que a aprendizagem da solução de problemas típicos, que envolve o domínio de uma metodologia de trabalho, um formalismo matemático adequado, a utilização correta de grandezas e unidades físicas, bem como a avaliação final do resultado obtido, é parte fundamental da aquisição de conhecimentos físicos, é a parte que evidencia o potencial do que foi aprendido na solução de problemas teóricos e/ou práticos. Sem chegar a essa aplicação do conhecimento científico raramente se poderá dominar as teorias que o compõem. **Porém, esse aspecto, basicamente técnico da aprendizagem científica, não é suficiente para fornecer uma visão razoável do complexo sistema representado por qualquer ramo do conhecimento, especialmente a Física** (ZANETIC, 1989, p. 17, grifo meu).

Uma das formas de promover uma aproximação razoável, entre física e cultura, contendo expressões do caráter humano, social, cultural que a física possui, onde possam aparecer características da história e da filosofia da física, está presente na articulação didática, entre a física e a literatura, ou entre a física e a leitura de textos, inclusive de divulgação científica. Vários trabalhos apontam para a construção e uso dessa ponte. Piassi (2011) evidencia algumas potencialidades educativas do uso da literatura no ensino de física, mais especificamente sobre a literatura presente nos romances de Arthur Clarke. O autor também destaca que na área de pesquisa em ciências existem muitos trabalhos voltados para o papel da leitura no ensino de ciências.

O papel da leitura e da palavra como representação de conceitos científicos pode ser explorado como uma importante ferramenta para interpretação de conceitos, como apontam, ainda que com enfoques distintos, os trabalhos de Almeida, Silva e Machado

(2001), Andrade e Martins (2006), Baker (1991), Barbosa-Lima e Carvalho (2003), Barcellos (2005), Briccia e Carvalho (2011), Carvalho e Zanetic (2004, 2005), Ferraz et al. (2001), Francisco Junior (2009), Lima (2000), Machi e Leite (2010), Menezes (2005), Nascimento e Barbosa-Lima (2006), Nigro e Trivelatto (2010), Norris et al. (2005), Padilha e Carvalho (2011), Paula e Lima (2010), Silva e Almeida (2005), Souza, R e Souza, P. (2005), Valente, Barcellos e Zanetic (2007).

Vale ressaltar que uma importante publicação sobre essa temática foi lançada no *Journal of Research in Science Teaching* (1994), em número especial, chamado de “*The Reading – Science Learning – Writing Connection*”, cujos artigos tratam das relações entre ensino da ciência e leitura e produção da escrita. Os artigos somam onze produções, a saber: Holliday et al. (1994), Alexander e Kulikowich (1994), Baker e Saul (1994), Fellows (1994), Gaskins et al. (1994), Glynn e Muth (1994), Hynd et al. (1994), Keys (1994), Norris e Phillips (1994), Rivard (1994), Spiegel Junior e Barufaldi (1994).

Outra temática associada ao estudo de textos no ensino de ciências aparece denominada como divulgação científica. Nascimento e Rezende Junior (2010) realizaram uma importante revisão de literatura no período de 1997 a 2007, apontando que os estudos sobre esse tema restringem-se ao funcionamento dos textos e seu sentido pelos sujeitos leitores em diferentes níveis de ensino. Alertam que poucos estudos têm se preocupado com a discussão, na formação inicial, dos aspectos relacionados à divulgação científica, ou sobre as interações discursivas entre futuros professores e esses textos. Os autores alertam para a necessidade de estudos teóricos, a fim de investigar as relações entre o uso da divulgação científica e o ensino formal de ciências.

Com base em sua revisão bibliográfica, constatam que a divulgação científica é uma prática corrente entre os professores de ciências, porém seu potencial didático não é explorado na formação inicial dos professores. Por fim, esses autores criticam a dicotomia entre o baixo nível de publicações nos periódicos nacionais e internacionais e o número de trabalhos sobre a divulgação científica nos trabalhos de mestrado e doutorado, o que implica que esses trabalhos não estão sendo publicados em forma de artigos nas principais revistas de ensino de ciências.

Chaves, Mezzomo e Terrazan (2001) apresentam uma proposta de inserção da FMC através de materiais de divulgação científica. Conforme os autores, os professores envolvidos na mediação texto-aluno percebem a importância da inserção de materiais de divulgação científica, mas alertam para a dificuldade deles em identificar os conceitos físicos nos textos selecionados, o que aponta para uma possível dificuldade leitora e interpretativa, também, pelos professores, o que pode se justificar pela falta de ações de leitura nas aulas de física, sendo necessário que mais trabalhos que envolvam a leitura de textos de divulgação no ensino aprendizagem venham a se concretizar.

Para Monteiro, I., Gaspar e Monteiro, M., (2005), a leitura de textos de divulgação científica possui um papel desencadeador de motivação no leitor, pois sua linguagem é mais acessível, possibilitando um gosto maior por parte dos alunos no estudo da física. De acordo com Strack, Loguércio e Del Pino (2009), a leitura de divulgação científica guarda um potencial enorme de pesquisa e um possível espaço para inserção de novos saberes pautados em conceitos, percebendo-se a existência de uma motivação geradora pelas leituras.

Os trabalhos específicos que tratam da física e literatura demonstram a literatura como possível meio de se ensinar conceitos científicos, despertando a curiosidade e a

imaginação dos estudantes, além de propiciar maior estímulo no estudo de temas científicos como se verifica nos trabalhos de Guerra e Menezes (2009), que utilizam obras literárias para contextualizar conceitos físicos com os alunos. Lopes e Salomão (2009) demonstram uma potencialização da aprendizagem científica por meio da literatura, além de um maior estímulo por parte dos estudantes aos estudos de temas científicos.

Pinto e Raboni (2005) realizam um estudo exploratório sobre as concepções científicas em livros classificados por editores como literatura infantil. Na pesquisa os autores relatam sobre a falta de estudos sobre o tema, além de apontar para os benefícios na aprendizagem das ciências quando se aproximam a literatura infantil e o ensino de ciências, possibilitando melhor aprendizado científico e desenvolvimento da habilidade leitora por parte dos estudantes.

As relações entre a física e a literatura enquanto arte, como processo de criação, como já definido no início deste capítulo, pode se apresentar em várias facetas, como no teatro, na letra de uma música, ou em um poema, apresentando variáveis culturais importantes para o ensino de física. Essas vertentes são exploradas e apresentadas por Nory; Zanetic (2005), Zanetic (1989, 2002, 2005, 2006, 2007, 2009). Nesse contexto, Lima; Barros e Terrazan (2004) promovem um encontro entre o ensino de física e a literatura que explora fatores presentes no poema *Mensagem* de Fernando Pessoa, articulando a imaginação, a leitura e a interpretação com o ensino de física. Menezes e Guerra (2009) mostram a literatura como caminho para o ensino de conceitos científicos, possibilitando o despertar da imaginação por parte dos alunos.

A convergência entre a literatura universal e o ensino de física, contendo elementos da história da física é explorada por Zanetic (1996) ao indicar influências

entre grandes escritores a partir do alvorecer da física clássica no século XVI e grandes cientistas como Galileu, Newton e Einstein. O uso de textos históricos de Galileu Galilei, no ensino de Mecânica para alunos de EM foi abordado por Lima (2012). E relações entre a física e a literatura, por meio de extratos de filosofia da ciência, estão presentes em Custódio Pinto e Zanetic (2000).

A utilização da literatura de ficção científica, de textos de ficção científica e romances no ensino de física, possui vários aspectos a serem explorados. Esse tipo de pesquisa relacionada com o ensino de física se verifica em Piassi (2007), que se utiliza de vários filmes e contos de ficção científica no ensino de física. Pereira e Londero (2013) também se utilizam de *Alice no País do Quantum* no ensino de partículas elementares. Silveira (2010), por sua vez, usa a obra de Monteiro Lobato para relacionar o ensino de ciências e a literatura.

Nesse contexto, Neto (2004) e Vierende (1994), estabelecem ligações entre o ensino de ciências e as obras de ficção de Júlio Verne. Para Vierende (1994) a obra de Júlio Verne vai conquistando uma legião de leitores, mas é uma conquista que não se encerra apenas na leitura, ela participa da constituição de uma concepção de mundo que, em alguns casos, tornar-se-á um marco em suas vidas.

Um desses efeitos é de certa maneira direto, e corresponde ao objetivo manifestado pelo editor e pelo seu autor: muitos exploradores e cientistas confessam ter descoberto a sua vocação através da leitura adolescente dos romances de Júlio Verne (VIERNE, 1994, p.88).

Salientamos que o uso da literatura como ferramenta didática, não se resume à física. O ensino da matemática também pode se influenciar das relações entre a leitura e o desenvolvimento de conceitos matemáticos abstratos. Em Teixeira e Mendes (2006), estabelecem-se as relações matemáticas presentes na obra *Alice no País das Maravilhas*.

Também propõem formular proposições argumentativas favoráveis ao uso eficaz de romances matemáticos na construção do conhecimento.

Apesar da revisão bibliográfica apresentada, ressalta-se para a escassez de trabalhos que investiguem a fundo as relações existentes entre a física e a literatura. Em geral, os estudos vêm apontando para uma aproximação, com indicações para a existência de uma melhor compreensão conceitual pelos alunos que leram textos científicos, apresentando, inclusive, melhores resultados, quando comparados com alunos que seguiram um ensino tradicional, sem leitura alguma (NIGRO; TRIVELATO, 2010). Apontam também para o aumento da curiosidade e do prazer, ao se trabalhar esses conceitos pelo viés da leitura e não pelo formalismo matemático tradicional, desempenhando um papel desencadeador de motivação no leitor, pois sua linguagem é mais acessível, possibilitando um gosto maior por parte dos alunos no estudo da física (MONTEIRO et al., 2005).

Alguns trabalhos, como de Flôr e Cassiani (2011), de Kemper, Zimmermann e Gastal (2010), mostram que uma linguagem mais acessível ao conhecimento científico pode facilitar a transposição didática de conceitos; indicam, para a necessidade de formar professores, também leitores, para que se possa mediar a leitura em sala de aula de forma a garantir um aprendizado em física mais significativo. Alertam que poucos estudos têm se preocupado com a discussão, na formação inicial, dos aspectos relacionados à divulgação científica, ou sobre as interações discursivas entre futuros professores e esses textos. Demonstra-se, que os professores não tem tido, tanto na sua formação inicial, quanto na continuada, oportunidades de refletirem sobre o papel da leitura no aprendizado e ensino de ciências. Concluem, portanto, sobre a necessidade de estudos teóricos, a fim de investigar as relações entre o uso dessas leituras e o ensino formal de ciências. Verificam que a divulgação científica é uma prática corrente entre

os professores de ciências, porém seu potencial didático não é explorado na formação inicial destes.

Os poucos trabalhos que apresentam alguma crítica a respeito do uso de leituras, apontam para os erros conceituais existentes nos livros de divulgação científica, ou paradidáticos (SOUZA; SOUZA, 2005). Entretanto, nesses casos esquecem-se de uma particularidade muito importante: investigar e levar em consideração o papel mediador do professor no uso de recursos literários no ensino de ciências. Sem essa mediação, a leitura, por si só, pouco oferecerá em termos de aprendizado científico, o que aponta para a necessidade de inserir na formação de professores de física, recursos literários, em conjunto com os conteúdos específicos da disciplina.

Tal necessidade se manifesta na constatação de que os professores de ciências, em geral, apresentam uma possível dificuldade leitora e interpretativa, o que pode se justificar pela falta de ações de leitura nas aulas de física, sendo necessário que mais trabalhos que envolvam a leitura de textos no ensino e aprendizagem venham a se concretizar como indicado por Chaves, Mezzomo e Terrazan (2001) e Machi et al., (2010).

Outros autores, como Strack, Loguércio e Del Pino (2009) destacam que há um bom número de professores de ensino superior (ES) que não inserem leituras de textos em suas aulas, por falta de tempo, tanto em lecionar, quanto em cumprir o programa dos conteúdos, pois se veem obrigados a ler e publicar artigos em demasia, não sobrando tempo para leituras em sala de aula. Admitem que seria bom inserir leituras durante as aulas, mas se veem impedidos. Todavia, apesar desses impedimentos, acreditam que a leitura guarda um potencial enorme de pesquisa e um possível espaço para inserção de

novos saberes pautados em conceitos, percebendo-se a existência de uma motivação geradora pelas leituras.

Entretanto, apesar de todas essas considerações e contextualizações, torna-se relevante salientar que os vários trabalhos voltados para o papel da leitura no ensino de ciências consideram que trabalhar a leitura em aulas de Física é trabalhar com a ciência na sociedade e na história; é trabalhar a compreensão da própria ciência como produtora de sentidos (ALMEIDA et al., 2001). Mas, esses trabalhos pouco consideram as relações da física com a literatura. Se é importante a inserção da história/filosofia da física - que constituem uma espécie de literatura específica, literatura histórica e literatura filosófica - em seu ensino, porque não se construir uma ponte didática que permita aos estudantes caminharem seguramente entre um texto literário, que contenha textos filosóficos ou históricos, e um livro-texto científico? O que falta? Uma possível resposta a essa indagação será apresentada ao longo dessa dissertação, pois se entende que há uma lacuna existente nos estudos que tratam da importância da história, da filosofia, dos textos e da leitura.

As relações e os apontamentos obtidos dos trabalhos analisados em nossa revisão de bibliografia são bem claros: deve-se levar a leitura para o ensino de ciências. Isso traz significado e facilita a compreensão dos alunos em relação aos conceitos físicos, permitindo melhor entendimento a respeito dos fenômenos que estudam. O que falta é mostrar qual é o amálgama que garante essa aproximação, ou seja, investigar o que realmente acontece com o estudante, quando ele é aproximado da literatura, da leitura de textos, sejam elas, literaturas científicas, históricas, filosóficas, ou de divulgação científica, e de que forma o estudante irá relacionar essa leitura com os conceitos físicos, beneficiando-o em seu aprendizado. Uma possível forma de se preencher essa lacuna será apresentada mais adiante, quando se pretende mostrar que da

leitura surgem pseudoconceitos, que são transformados em abstrações científicas, possibilitando ao estudante um melhor aprendizado dos conceitos físicos estudados, complementando o formalismo matemático e dando sentido a este.

Outro aspecto importante é o de que a inserção da leitura e de textos não é consolidada como objeto de ensino nos conteúdos de física do EM ou mesmo do Ensino Superior (ES). Os conteúdos de Física Clássica ou Física Moderna e Contemporânea, não abordam em seu ensino a introdução de leituras, sejam essas literárias, filosóficas, históricas ou de divulgação científica, nem exploram seus potenciais didáticos. Há casos de trabalhos isolados, mas constituem exceções no ensino de física, que não se concretizam, por exemplo, em livros textos a serem utilizados pelos professores em sala de aula. O mesmo se aplica aos livros de Ensino Superior.

1.2 A ANALOGIA NO ENSINO DE CIÊNCIAS/FÍSICA

Da mesma forma que a literatura constitui-se por seu aspecto escrito, textual, também ela é considerada uma arte, com dimensão criadora. Disso decorre que a literatura também se utiliza de figuras de linguagem, o que constitui certa estética em sua escrita, e dentre essas figuras ressaltamos as metáforas e as analogias.

Uma metáfora, como uma figura de linguagem, significa o emprego de uma palavra ou uma expressão, com o intuito de produzir sentidos figurados ao estabelecer uma relação de comparação entre dois termos. Do grego *metaphorá* significa "mudança" e "transposição". Assim como essa figura de linguagem, outros recursos são utilizados pela literatura, como o uso de analogias, que na língua se dá pela construção de ideias baseadas nas já existentes, significando a semelhança entre coisas diferentes. Isso será evidenciado em nossa pesquisa pelas analogias literárias e físicas, presentes

em *Alice no País do Quantum* e a devida transposição para os conceitos sobre MQ estudados com os alunos.

Já em um sentido cognitivo, como citado anteriormente, a utilização desses recursos pode se constituir em uma ferramenta que possibilita a transposição entre um conhecimento concreto e um conhecimento abstrato. Para Lakoff e Johnson (1980), a essência de uma metáfora é a de: “*compreender e experimentar um tipo de coisa em termos de outra*” (p. 47). O que denota que procurar por uma metáfora adequada facilita se aproximar, o mais semelhante possível, daquele elemento da realidade que nos interessa.

Nesse sentido, a curiosidade dos alunos é estimulada e o papel que *Alice* desempenha é o mesmo que proporciona o *demônio de Maxwell*, o *anjinho do GREF*, a *formiga do Menezes*, o *paradoxo dos gêmeos* ou o *gato de Schrödinger*¹². Todas essas figuras de linguagem, ilustrações, experimentos de pensamento, constituem-se em um veículo que conduz os alunos ao ficcional, facilitando uma percepção primeira, a formação de um entendimento inicial, ou pseudoconceito que tratado didaticamente pode vir a ser abstraído e generalizado em conceitos físicos apropriados, além de proporcionar maior prazer em se estudar física.

Como exemplo, a figura 1 abaixo pode ser utilizada como uma ferramenta para mostrar aos alunos a ideia e o conceito físico do efeito do padrão de interferência por elétrons ao atravessarem uma dupla fenda, possibilitando experimentar uma coisa (uma ilustração que mostra metaforicamente o fenômeno da interferência pelo experimento

¹² O GREF, sigla do Grupo de Reelaboração do Ensino de Física, tinha por objetivo elaborar uma proposta de ensino de física vinculada à experiência cotidiana dos alunos. Possui três volumes ricamente ilustrados, sendo os conteúdos apresentados e conduzidos por um anjinho. A formiga do Menezes constitui um paradoxo a respeito da relatividade, pode ser verificado em Menezes (2005, p. 120-121). O demônio de Maxwell, a ilustração dos gêmeos na relatividade e o gato de Schrödinger, também constituem paradoxos, i.e., metáforas que levam ao ficcional, a fim de facilitar o entendimento conceitual mais abstrato.

de Young com elétrons), em termos de outra (uma alegoria sobre a hipótese de De Broglie a respeito de sua teoria sobre a dualidade onda-partícula da matéria):

Figura 1: Alice observando elétrons atravessando uma barreira de dupla fenda e verificando o padrão de interferência no anteparo atrás da barreira, o que mostra o comportamento ondulatório dos elétrons. (GILMORE, p. 58, anexo I).

O uso dessa analogia, por meio de uma ilustração, desperta de imediato no aluno uma curiosidade sobre o fenômeno descrito. Curiosidade que, aliás, é elemento essencial de qualquer ciência. Tal curiosidade permite explorar muitos conceitos físicos nessa figura, a saber, as imagens disformes próximas ao canhão representam elétrons, um aluno pode questionar porque não é possível vê-los nitidamente, abrindo a possibilidade ao professor de explicar sobre o princípio da incerteza de Heisenberg, que afirma que é impossível determinar a posição e a velocidade de um elétron ao mesmo tempo. Da mesma forma, outro aluno pode perguntar o que são as formas pontudas nos elétrons, que em alguns está apontada para cima e em outros para baixo, o que permite explicar que representam o spin do elétron.

As possibilidades se ampliam, pois a curiosidade dos alunos pela figura pode fomentar a inserção de textos históricos sobre o surgimento da MQ, sobre o experimento de Young, sobre dualidade onda-corpúsculo, entre outros, como elementos histórico/filosóficos da física, que tratem da construção de uma nova física dada pela quebra de paradigmas no final do século XIX e início do século XX. É possível também explicar sobre o papel do observador nos experimentos. Extrapolando, se for o caso, o professor ainda tem abertura para tratar de assuntos éticos e sociológicos sobre o caráter da ciência, a partir dos avanços da nova física que levaram ao estudo do núcleo atômico que possibilitaram entender desde o funcionamento de estrelas distantes até a construção de armas de destruição em massa.

Entretanto, facilmente se verifica que a mesma gama de possibilidades e potencialidades de ensino não se consegue se apenas apresentássemos aos alunos a expressão:

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \text{ seguida de uma lista de dez ou vinte exercícios!}$$

Todavia, não propomos que a expressão matemática deva ser suprimida, pelo contrário, ela é importante, mas deve ser contextualizada. O que se propõe é que, com o uso de analogias, metáforas, figuras e ilustrações, é possível potencializar o ensino de física, pois temos o interesse e a curiosidade dos alunos a nosso favor, possibilitando uma porta de acesso aos conteúdos que queiramos ministrar. Com essa estratégia, podemos ao final do aproveitamento didático dessas possibilidades, apresentar o comprimento de onda de Broglie, o que garante o entendimento e a aceitação da expressão matemática e dá sentido a ela, bem como a exercícios que a utilizem. Assim, podemos potencializar esses recursos pedagógicos que, na visão de Ortony (1975),

fornece uma riqueza de detalhes no que se refere ao potencial comunicativo, ressaltando que:

A vividez imaginária ascendendo da compreensão metafórica encoraja a capacidade da memória e gera a necessidade de um melhor, mais penetrável, entendimento pessoal [...]. **O grande valor pedagógico do uso figurativo da linguagem é encontrar seu potencial para transferir aprendizado e entendimento do que é conhecido para o que é menos conhecido** e, então, fazê-lo de maneira muito vivida (ORTONY, 1975, p. 51 e 53, grifo meu).

A fim de verificar mais a fundo o uso de analogias no ensino de ciências/física, assim como verificar as potencialidades descritas, bem como suas limitações, encontramos em nossa revisão de bibliografia diversos trabalhos sobre o tema.

A edição especial do Journal of Research in Science Teaching, de 1993, trata exclusivamente de pesquisas sobre analogias, intitulada “*O papel da Analogia na Ciência e no Ensino de Ciência*”, onde se investiga, dentre outros fatores, como a analogia propicia um aumento significativo da taxa de retenção e de aprendizagem, através do estudo dos princípios de modelagem neural de Grossberg, que mostra como a mente é capaz de reconhecer e lembrar, ao igualar a entrada sensorial de novos objetos, eventos ou fenômenos com registros análogos, ou situações do passado. Isso indica que as analogias podem facilitar a aprendizagem e a retenção, ao aumentar a atividade neural em um crescimento exponencial, construindo um *feedback*, com esse aumento da atividade neural, no qual ocorre o armazenamento e a retenção de memória a longo prazo, fazendo com que, segundo os autores, a aprendizagem se instaure (LAWSON D.; LAWSON A., 1993). Nessa edição também constam os trabalhos de Brown (1993), Clemente (1993), Harrison e Treagust (1993), Lawson (1993), Schwartz (1993), Stavy e Tiroshi (1993), Sutton (1993), Wong (1993).

O uso de análogos no ensino de ciências/física apontando para melhor aproveitamento dos estudos pode ser verificado em Almeida (2004), Kemper, Zimmermann e Gastal (2010), Zambon e Terrazan (2013). Ressaltamos o estudo elaborado por Kemper, Zimmermann e Gastal (2010), que também defende o uso de analogias e metáforas para o letramento científico dos alunos. Silva e Martins (2010) avaliam o uso de analogias para transpor conceitos concretos em abstratos a fim de facilitar o entendimento dos alunos, além de contribuir para um ensino de física mais agradável. O mesmo evidencia-se em Custodio Filho e Oliveira (2000), Gomes e Souza (2008), Gomes-Maluf e Souza (2008), Silva e Terrazan (2009), Terrazan (1996).

As potencialidades e limitações das analogias e metáforas são exploradas, inclusive no ensino universitário pelos trabalhos de Bozelli e Nardi (2005, 2006), Flôr e Cassiani (2011); Londero e Terrazan (2005), Otero, Moreira e Greca (2002). Outras contribuições e limitações sobre o uso de analogias são encontradas nos trabalhos de Duarte (2005), Menezes et al. (1994), Silva e Almeida (2008), Silva et al. (2006), Souza, Justi e Ferreira (2006), Terrazan e Feltrin (2000).

As analogias e metáforas como recursos de linguagem e facilitadoras de processos discursivos e de interação social e cultural são estudadas por Barja e Redigolo (2005), Bozelli (2005), Bozelli e Nardi (2012), Cunha (2006), Gomes, Souza e Piassi (2010), Laburú e Silva (2011), Piassi e Oliveira (2005), Piassi e Pietrocola (2007), Sasseron (2011).

Assim, os trabalhos em geral acima apresentados apontam para um melhor aprendizado e melhor aproveitamento em avaliações com o uso de analogias, quando comparados com provas tradicionais. Indicam ainda a facilidade que as analogias proporcionam para transpor conceitos concretos em abstratos, a fim de facilitar o

entendimento dos alunos, além de contribuir para um ensino de física mais agradável. Permitem também melhor preparo dos professores para lidar com questões de linguagem, procurando deixar claro aos alunos o que são representações, metáforas e analogias usadas na elaboração de modelos e nas explicações de conceitos científicos. Mostram ainda que o raciocínio analógico parece ser a fonte da compreensão dos estudantes com relação ao entendimento dos conceitos teóricos. Nesse sentido as analogias são facilitadoras para a aprendizagem de disciplinas abstratas como a física.

Entretanto, apesar de considerável *corpus* de trabalhos teóricos e empíricos sobre a utilização de analogias no ensino de ciências, como mostra a revisão bibliográfica histórica/filosófica de Duarte (2005), pouco impacto real está sendo observado na sala de aula e nos livros didáticos. Paradoxalmente, os autores concordam quanto à melhoria da aprendizagem em ciências com o uso de analogias, sendo consenso em se considerar como proveitoso o uso das analogias por se constituírem como ferramenta de pensamento que possibilita a compreensão de um novo conhecimento através de um conhecimento anterior mais familiar.

Uma possível explicação para isso é a lacuna existente nos estudos dessa área quanto a trabalhos com propostas metodológicas que ofereçam material didático, nos quais os conteúdos programáticos sejam desenvolvidos paralelamente com análogos conceituais, a fim de que se verifique sua validade quanto à melhoria do aprendizado dos alunos nas aulas de física.

Mas, é válido o alerta feito por Gilmore (2008) em relação ao uso de analogias:

Este livro é uma alegoria da física quântica, no sentido dicionarizado de "uma narrativa que descreve um assunto sob o disfarce de outro." **O modo pelo qual as coisas se comportam na Mecânica Quântica parece muito estranho para nossa maneira habitual de pensar e torna-se mais aceitável quando fazemos analogias com situações com as quais estamos mais familiarizados, mesmo quando essas analogias possam ser inexatas.** Tais analogias não podem nunca ser uma representação

verdadeira da realidade, na medida em que os processos quânticos são de fato bastante diferentes de nossa experiência ordinária (GILMORE, 2008, p.3, grifos meus).

É interessante ressaltar que o autor assume o risco a respeito do uso de analogias, mesmo sendo essas consideradas inexatas. Tais riscos devem ser levados em consideração quando o professor adota o uso de analogias no ensino de física, pois tendo conhecimento de suas limitações, o docente poderá avaliar com mais propriedade sobre a vantagem de seu uso ou não, dependendo do conteúdo que será abordado com os alunos, verificando se os análogos ajudam ou pioram o entendimento conceitual a ser desenvolvido.

1.3 QUANDO A ESTÁTUA DE SANTO PODE VIRAR SANTO¹³

Mario Bunge, físico e filósofo, considera a metáfora adequada apenas à poesia, ao pensamento arcaico, ao discurso político sob tirania e à elucubração pós-moderna, compreendendo-a da seguinte forma: "*enquanto as teorias científicas são testáveis no tocante às suas verdades, as metáforas, no melhor dos casos, são sugestivas, e no pior delas causam confusão*" (BUNGE, 2002, p. 244).

A crítica ferrenha de Bunge, sobre esse recurso linguístico poderia afastar um professor menos atento às vantagens de seu uso. Podemos considerar que Bunge tem razão ao se referir sobre as metáforas como sugestivas; como também tem razão ao considerar que podem causar confusão, se pensarmos apenas no formato técnico do desenvolvimento dos saberes físicos, podemos coadunar com seu pensamento. É possível que Bunge esteja se referindo especificamente ao conhecimento científico. Entretanto, se pensarmos no aluno de EM, que, em princípio, não será formado como físico, então, podemos discordar dessa afirmação.

¹³ O professor Luís Carlos de Menezes recorre a essa parábola para alertar sobre o uso de símbolos, que, se forem mal interpretados, podem vir a substituir aquilo que representam (MENEZES, et al., 1994).

Sobre esse uso didático, vale ressaltar que os processos de interpretação das analogias pelos alunos exercem uma grande influência na sua compreensão. Porém, cada indivíduo pode assimilar de um modo singular as informações recebidas, sendo possível que haja interpretações diferentes para cada analogia, o que requer muita cautela em relação ao seu uso. Cabe ao professor questionar se o análogo é realmente familiar ao aluno, caso contrário pode se construir um obstáculo ao aprendizado, quando o análogo venha a ser tão incompreensível quanto o conceito físico a ser estudado (CUNHA, 2006).

Ao pesquisar como os alunos interpretam os modelos atômicos de Thompson e Bohr, Souza, Justi e Ferreira (2006), verificaram que os alunos pesquisados, em sua maioria, não compreendem as analogias nem o motivo de haver dois modelos distintos para o átomo. Isso pode indicar uma lacuna existente na literatura sobre estudos que apontem como os alunos realmente compreendem as analogias que lhes são apresentadas. Souza e Souza (2005) apontam os erros conceituais presentes em textos paradidáticos, concluindo que a maioria dos leitores não percebem os erros contidos na leitura, o que sugere cautela no uso de tais recursos. Nesse sentido, mais uma vez o papel de mediador exercido pelo professor é fundamental.

Em geral, as desvantagens na utilização de analogias, metáforas, livros ou narrativas de divulgação científica, são os riscos concernentes à semicultura¹⁴, cujo termo fora delimitado e usado por Adorno e Horkheimer (1985), da escola de Frankfurt, ao pesquisarem sobre a decadência dos processos formadores da cultura. Assim sendo, como discutiremos mais adiante, a semicultura parece já fazer parte da população em

¹⁴ A semiformação ou semicultura é uma espécie de cultura criada e formatada pelos interesses da indústria cultural, portanto submetida aos interesses do mercado. A indústria cultural é para Adorno e Horkheimer (1985) a expressão máxima da deturpação do esclarecimento. Ela infiltra-se no projeto do esclarecimento como “idolatria daquilo que existe e do poder pelo qual a técnica é controlada” (HORKHEIMER E ADORNO, 1985, p. 16).

geral, em especial da população jovem, estudantes de EM, cuja indústria cultural influencia fortemente sua forma de pensar e agir no mundo, o que sugere um olhar mais atento sobre como eles interpretam os fenômenos físicos a que são apresentados.

De acordo com Ricardo et al. (2007), o uso de recursos como a divulgação científica pode trazer riscos, uma vez que as grandes massas não possuem, ainda, uma cultura científica adequada, que possa, por ela, ser interpretada de forma a permitir um acesso consciente sobre os aspectos das ciências, podendo aumentar a semicultura e uma visão distorcida dos saberes científicos:

Os defensores da divulgação científica, por exemplo, apoiam-se, em parte, na necessidade de levar os mais recentes resultados da ciência e da tecnologia até a população leiga, a fim de que esta esteja esclarecida acerca dos acontecimentos sociais significativos que envolvam aspectos científicos e tecnológicos e possa, dessa maneira, emitir juízo de valores e tomar decisões.

Essa, de fato, é uma expectativa para a qual não se tem a garantia de sucesso. O objetivo é nobre, mas a premissa pode ser falsa. Ou seja, ainda não há uma cultura científica permeando os interesses populares.

Pode-se, ao contrário, verificar mais riscos que benefícios em uma divulgação científica pouco cuidadosa, na medida em que tal empreendimento por vezes se reduz a uma semicultura e a uma visão mítica da ciência e da tecnologia. A imaginação popular é fértil para derivar daí os mais variados produtos com forte apelo mercadológico, os quais pouco ou nada esclarecem a respeito da ciência e da tecnologia e seus processos (RICARDO et al., 2007, grifo meu).

A fim de se evitar os riscos inerentes à semicultura, tivemos o cuidado em nosso estudo de filtrar os saberes físicos referentes à FMC e MQ contidos nos três capítulos do livro adotado para leitura, para dali trabalhá-los em sala de aula com os alunos. Usamos, inclusive, a noção da semicultura para apresentar aos estudantes seus riscos e malefícios, buscando com isso uma aprendizagem que esclareça os riscos de uma má interpretação, a respeito de tópicos de FMC e MQ.

Consideramos que a utilização das narrativas desses três capítulos é aceitável, mesmo sabendo dos riscos da semicultura, pois facilitam a aceitação do tema de estudo por parte dos alunos. Como fios condutores, os três primeiros capítulos selecionados

permitem que sejam inseridos os saberes físicos sobre FMC e MQ, ou seja, apresentamos literaturas de ficção científica como uma preocupação na motivação e envolvimento dos alunos. Mas, nosso foco principal são os conteúdos de FMC e MQ que serão trabalhados.

As vantagens em se considerar a ficção científica são ressaltadas na proposta curricular do Estado de São Paulo:

A ficção científica estimula a imaginação do adolescente, instigando a busca pelo novo, pelo virtual e pelo extraordinário. Nesse sentido, mesmo os jovens que, após a conclusão do Ensino Médio, não venham a ter qualquer contato com práticas científicas, ainda terão adquirido a formação necessária para compreender o mundo em que vivem e participar dele, enquanto os que se dirigirem para as carreiras científico-tecnológicas terão as bases do pensamento científico para a continuidade de seus estudos e para os afazeres da vida profissional ou universitária... O uso de filmes comerciais e didáticos, envolvendo fenômenos naturais, tecnologias e montagens experimentais, também permite introduzir na sala de aula a dimensão empírica (SEE/SP, 2008, pg. 42-46).

Dessa forma, temores a respeito de que a leitura de textos da literatura científica possa contribuir com concepções errôneas de processos naturais, os quais devem ser analisados cientificamente, podem ser tratados didaticamente. Isto porque, de acordo com o pensamento de Vygotsky (2008), a leitura de ficção não é capaz de terminar com a concepção de ideias e valores científicos, assim como não ocorre apenas no final de uma aula. O processo cognitivo, neste caso, proporciona apenas um pseudoconceito, um ponto de partida que deve lançar luz e estímulos a um processo de retroalimentação em direção à aquisição completa do conhecimento formal.

Viennot (1977) e Saltiel (1978) já mostraram que não há plena clareza, sobre a forma em que os alunos aprendem conceitos físicos. Conforme as autoras, a preocupação com a aquisição de concepções errôneas se deve à falta da compreensão da evolução dos processos de construção dos conceitos científicos pelos alunos. Bachelard já alertava que:

Na educação, a noção de obstáculo pedagógico também é desconhecida. Acho surpreendente que os professores de Ciências, mais do que os outros se possível fosse, não compreendam que alguém não compreenda. (...) **Não levem em conta que o adolescente entra na aula de Física com conhecimentos empíricos já constituídos; não se trata, portanto de adquirir uma cultura experimental, mas sim de mudar de cultura experimental, de derrubar os obstáculos já sedimentados pela vida quotidiana** (BACHELARD, 1996, p.23, grifos meus).

A título de exemplificação, mesmo a formulação tradicional de um conceito científico, partindo de um contexto formal de sala de aula, não garante a eliminação de concepções errôneas correlatas. Muitas interferências, deficiências de comunicação e a presença de errôneas concepções semelhantes diminuem a eficiência do processo de aprendizagem formal. Nada garante que um aluno que tenha assistido a uma aula sobre Cinemática, por exemplo, ao final desta tenha abstraído os conceitos de Movimento Retilíneo Uniforme. E, logo em seguida, se for inquirido sobre o que ocorre com uma pedra solta pela mão de um ciclista que se movimenta com velocidade constante em uma linha reta, poderá ter dificuldades em responder se a pedra cai para trás, para frente, ou cai nos pés do ciclista. Em muitos casos, verificar-se-á que a primeira resposta é a escolhida. Isso mostra que certos saberes do senso comum são difíceis de serem superados e, de certa forma, somam-se a uma semicultura já existente nos alunos.

Menezes, Kawamura e Hosoume (1994) lembram que os objetos e objetivos no aprendizado da física se confundem com seu principal problema, que representa a seleção de propriedades e estabelecimento de critérios, que não são desenvolvidos juntamente com os alunos. Ou seja, o ensino de física vem pronto, como uma receita, que basta usar, para logo se obter o produto desejado, em geral, a solução de um problema, por meio da aplicação de alguma expressão matemática. Para os autores, essa atitude produz uma lacuna formativa ao se omitir ou ao deixar de ensinar o próprio processo de produção da abstração, essencial à ciência, como retratam:

Na construção dessa ciência, a abstração que corresponde a simplicidade decorre de um longo processo, por vezes secular, que é a própria ciência em seu desenvolvimento. Também a construção do conhecimento individual, no aprendizado da ciência, decorre de um outro processo, em vários aspectos diferente do primeiro, semelhante em pelo menos um ponto: abstração nenhuma faz qualquer sentido na ausência dos objetivos específicos, variados, "reais", a partir dos quais foi possível o abstrair. **Para a ciência e para seu aprendiz, o símbolo precisa primeiro, ser criteriosamente construído, para só então, ser utilizado.** Além disso, não pode ser reificado a ponto de substituir o que simboliza, ou a estátua de santo vira santo... (MENEZES; KAWAMURA; HOSOUME, 1994, p.16, grifo meu).

Verifica-se que esse processo de produção da abstração, mencionado acima, é pouco presente, tanto nos livros didáticos quanto na formação dos professores. Acreditamos que, ao articularmos a física com a literatura, fomentamos a inserção da história e da filosofia da física nesse processo, pelo fato de permitir o acesso a um espectro cultural mais amplo daquele fornecido apenas pela resolução de problemas em listas de exercícios.

Mas, a inserção da história/filosofia da física no ensino de física também apresenta restrições. Dentre elas, a confusão estabelecida em se considerar que o professor de física iria ensinar história, a mesma confusão em se pensar que o professor de física teria que ensinar literatura, nos casos em que dela se utilizasse para potencializar o ensino de determinado conteúdo de física.

A questão a ser colocada deveria ser postulada quanto à validade ou não de se ensinar física abordando contextos, literários, filosóficos ou históricos. Segundo Pessoa Júnior (1996), sem dúvida a História da Ciência torna o curso interessante, pois além de ajudar no aprendizado ela pode ajudar o aluno a entender para que estudar ciências. Ressalta ainda o autor que a consideração essencial a ser feita está relacionada com o objetivo que se tem em mente ao ensinar física. Caso os objetivos se restrinjam a resolver equações, ou resolver problemas práticos, como consertar um televisor, a história, a filosofia e a literatura no ensino de ciências, talvez não tenha um papel

importante. Mas se levarmos em conta que podemos ensinar física para que o aluno aprenda como se faz ciência, para compreender como ela se insere no cotidiano, como gera tecnologia, como se relaciona com outras atividades humanas e culturais, então, parece claro que a utilização da história da ciência, da filosofia e da literatura, no ensino de física possui um papel importante e “*pode trazer gratas surpresas*” (PESSOA JUNIOR, 1996, p.4).

Ainda de acordo com Pessoa Junior (1996), deveria ser construído um escopo de textos históricos que ficasse disponível ao professor, para que dele se fizesse uso. Dessa forma, ao se estudar determinado conteúdo, o professor teria a disposição uma série de documentos, textos históricos, histórias ou trechos, que poderiam lhe ser útil na inserção e articulação da física, com a literatura, com a história e com a filosofia. O grande problema é que tal acervo ainda não existe.

Assim, o emprego da História da Ciência no ensino de física talvez apresente restrições inerentes aos objetivos de se ensinar física; definir seus objetos e objetivos é tarefa primordial para um bom desenvolvimento metodológico futuro. Contudo, outros obstáculos também são mencionados, como aqueles convencionados por pseudo-história (KLEIN, 1972) e quase-história (WHITAKER, 1979), referindo-se a variações do contexto histórico que simplifiquem em demasia os fatos, ou os ajustem, de tal forma que podem se corromper. Para Robillota (1988, p.9), “*ao tratarmos de modo simplificado um corpo de conhecimento que é muito complicado e repleto de sutilezas, podemos acabar por fazer com que ele se torne ininteligível aos estudantes*”. Assim, a pseudo-história surge em função de um processo de simplificação e adaptação equivocados, em que elementos complexos sejam apresentados como um produto final, de fácil compreensão, perdendo-se o contexto inicial abordado. Já a quase-história é apócrifa, uma vez que há uma falsificação de aspectos históricos de forma a sustentar

uma versão de fácil aceitação. Para Whitaker (1979), a quase-história é “*o resultado de muitos e muitos livros cujos autores sentiram a necessidade de dar vida aos registros desses episódios usando um pouco de história, mas que, de fato, acabavam reescrevendo a história de tal forma que ela segue lado a lado com a física*” (WHITAKER 1979, p. 109).

A esse respeito, podemos citar vários exemplos¹⁵, como a queda da maçã na cabeça de Newton, que o teria ajudado a formular a lei da gravitação, ou da descoberta do embuste da coroa do rei Hieron II de Siracusa por Arquimedes ao adentrar em uma banheira, bem como concepções distintas sobre Galileu por seus biógrafos e pesquisadores, que ora o interpretam como platônico, ora como empirista. Sobre os efeitos da quase-história, Matthews (1995) nos diz que:

A quase-história é um assunto complexo. Sabe-se que objetividade em história é, num certo nível, impossível: a história não se apresenta simplesmente aos olhos do espectador; ela tem que ser fabricada. Fontes e materiais têm que ser selecionados; perguntas devem ser construídas; decisões sobre a relevância das contribuições de fatores internos e externos para a mudança científica devem ser tomadas. Todas essas questões, por sua vez, sofrem influência das visões sociais, nacionais, psicológicas e religiosas do historiador. Num grau ainda maior, sofrem influência da teoria da ciência, ou da filosofia da ciência, em que o historiador acredita. Do mesmo modo como a teoria abraçada pelo cientista determina seu modo de ver, selecionar e trabalhar o objeto de estudo, também a teoria abraçada pelo historiador afetará seu modo de ver, selecionar e trabalhar o material de que dispõe. Como se diz por aí, se a filosofia da ciência é vazia sem a história, então a história da ciência, sem a filosofia, é cega (MATTEWS, 1995, p. 174).

Novamente, volta-se à necessidade de se definir os objetos e objetivos do ensino de física, pois definindo o tipo de ensino pode-se escolher o melhor método para empregá-lo de forma mais eficaz. Nesse sentido, uma discussão histórica, mesmo que apócrifa, pode ter alguma validade, ao menos em um primeiro momento, nem que seja para atrair a atenção dos alunos, permitindo que o ensino aconteça. Os seus efeitos

¹⁵ MARTINS (1998, 2000) discute a fragilidade dos usos mal feitos da história da ciência no ensino de ciência.

nocivos podem ser tratados didaticamente, desde que o professor assuma seu papel de mediador na aprendizagem de seus alunos. Talvez seja esse o fato que mantenha presente em muitos livros didáticos o problema da coroa do rei e Arquimedes e a maçã de Newton, pois são quase-histórias que fazem com que o aluno mantenha sua atenção. Talvez, seja esse seu principal recurso de existência e duração, afinal uma boa “história” se mantém com o passar dos tempos, sendo recontada de geração à geração, mesmo sendo apócrifa.

Objecções sobre esse debate podem ser encontradas em Thomas Khun (1970), quando este destaca que “*numa sala de aula de ciências, a história da ciência deveria ser distorcida para que os cientistas do passado fossem retratados como se trabalhassem o mesmo conjunto de problemas trabalhados pelos cientistas modernos*” (1970, p. 178).

Apesar das considerações levantadas até o momento, sobre as limitações apresentadas a respeito da utilização da literatura e seus recursos linguísticos, como as metáforas e as analogias, assim como a respeito do uso da história e filosofia da ciência nas aulas de física, a bibliografia apresentada nos indica que há mais benefícios do que malefícios em se abordar o ensino de física mediado por essas ferramentas.

Sobre esse aspecto, Strack, et al. (2012) entrevistaram diversos professores do ensino superior em química sobre a possibilidade de inserção da literatura de divulgação científica em seus programas de ensino. A maioria dos professores entrevistados reclama da falta de tempo, tanto em lecionar, quanto em cumprir o programa dos conteúdos. Mas, ao mesmo tempo, admitem que seria bom inserir leituras durante as aulas. Concluem, os autores, que a leitura de divulgação científica guarda um potencial

enorme de pesquisa e um possível espaço para inserção de novos saberes pautados em conceitos, percebendo-se a existência de uma motivação geradora pelas leituras.

São percepções como essas que acabam reforçando certa imobilidade no ensino de física, quanto a mudanças metodológicas e uso de novas ferramentas de ensino que possam tornar a disciplina mais inteligível para nossos alunos. Thomas Khun (1991) já havia sugerido que as mudanças de paradigmas – as ideias científicas - não ocorrem só por causa de novas descobertas, mas, na maioria dos casos, são ignoradas porque os cientistas não estão preparados para elas. Transpondo para o caso do ensino, a decisão de mudar depende de outras questões, como movimentos políticos e sociais. Ao citar Max Planck, Kuhn nos lembra que, *"Uma nova verdade científica não triunfa porque os que se opunham a ela veem a luz e saem convencidos, mas porque eles acabam morrendo e surge uma nova geração mais familiarizada com ela"* (PLANCK, apud KUHN, 1991, p. 191).

Como ressalta Matthews (1995), a história, a filosofia e a sociologia da ciência, não possuem todas as respostas ao desenvolvimento de um ensino eficaz em física, mas apresentam respostas interessantes, tais como: possibilitar a humanização da física, aproximando-a dos interesses pessoais, éticos e culturais; tornar as aulas desafiadoras e reflexivas, desenvolvendo o pensamento crítico dos alunos; contribuir para a superação do mar de falta de significação que se diz ter inundado as salas de aula de ciências, onde fórmulas e equações são recitadas sem que muitos cheguem a saber o que significam (MATTHEWS, 1995, p. 165).

Além disso, as limitações sobre o uso da literatura, da leitura de textos históricos, filosóficos, da leitura de ficção científica e a utilização de analogias e metáforas, constituem-se na dificuldade leitora dos alunos e dos professores; ou em

receios de que conceitos mal construídos em textos de divulgação científica aumentem a semicultura dos leitores; bem como uma história apócrifa da ciência venha a construir obstáculos ao aprendizado; ou que análogos sejam interpretados como o conceito estudado. Assim mesmo, a partir da bibliografia analisada, constata-se mais benefícios que malefícios, bastando ao professor assumir seu papel de mediação no ensino e aprendizagem de física.

Dessa forma, os cuidados necessários à implementação de um ensino de física sobre MQ, utilizando como ferramenta a literatura e seus recursos linguísticos, foi estabelecido com nossos alunos, como será evidenciado no quarto capítulo. Levamos em consideração as limitações aqui mencionadas, deixando-nos alertas para os riscos referentes ao aumento da semicultura de nossos estudantes, bem como para deixar-nos vigilantes quanto a possíveis reificações do nosso objeto de pesquisa em seus análogos. Destacamos a todo momento que os modelos utilizados não representam a realidade conceitual estudada, deixando-os conscientes de que a estátua de santo é uma representação, e não um santo. Buscamos, assim, um diálogo com o aluno na construção de seu conhecimento, permitindo que se estabeleça uma dialética no processo de ensino de física, como será tratado no capítulo 2, onde seja possível articular a física com outras formas de representação humanas.

1.4 A FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NO ENSINO MÉDIO

A introdução da Física Moderna e Contemporânea no ensino médio é de grande importância para a formação do estudante como futuro cidadão consciente do mundo tecnológico em que vive. O aparecimento dessa nova física possui relevantes elementos históricos e filosóficos a serem explorados, além de ter propiciado novas formas de pensamento humano. Sendo assim, seu ensino aos jovens é urgente, uma vez que

permite aos alunos, dentre outros, compreenderem fenômenos físicos ocultos no funcionamento das tecnologias que eles usam diariamente, constituindo-se como uma área de interesse para eles.

É imprescindível que o estudante do EM tenha conhecimento dos conceitos e fenômenos que constituem a tecnologia atual, uma vez que ela está presente em sua vida e, muito provavelmente, terá implicações em seu futuro profissional. Isso justifica a inserção de conceitos básicos da FMC, contribuindo, aliás, para construir uma ponte entre a física e o cotidiano. Com essa articulação, o aluno será capaz de analisar implicações da ciência em vários aspectos, como o social, o político, o ecológico, o filosófico, o histórico e o cultural, tornando-se, assim, capaz de assumir posturas éticas, quanto ao uso de tecnologias modernas que os estudos avançados em física proporcionam, vindo a se tornar, portanto, um cidadão consciente quanto às implicações da ciência.

O ensino de FMC no EM se encontra geralmente presente no programa de conteúdos de muitos livros e apostilas de física de forma fragmentada, além de aparecerem apenas no final do programa curricular, geralmente, depois de se ter estudado eletromagnetismo. Em suma, são dirigidos para os estudantes de 3º EM, no final do ano, quando os alunos já se encontram saturados e pressionados pelos exames vestibulares, o que os leva a quererem se dedicar mais às revisões de Mecânica, Termodinâmica, Óptica, Ondulatória, Eletricidade, enfim, aos conteúdos da física clássica, ainda dominantes nas cobranças destes exames. Tal pragmatismo histórico e institucionalizado gera, de início, uma recusa por parte dos alunos a se dedicarem aos estudos de FMC, além do que, em uma breve análise dos materiais didáticos disponíveis, percebe-se que tais assuntos se reduzem a breves apresentações. De modo geral, encontram-se presentes conteúdos que tratam da Teoria da Relatividade Restrita

com o Paradoxo dos Gêmeos; da Radiação; da Matéria e, em alguns casos, abordam aspectos das partículas elementares. Já os conteúdos sobre Mecânica Quântica são raras exceções.

Apesar desse material didático, mesmo fragmentado, existir, verifica-se que a presença concreta do ensino de FMC no EM não se encontra estabelecido, isto é, não aparece, de fato, na sala de aula; pelo menos não com a mesma frequência que a Mecânica, por exemplo, constituindo-se em um problema que tem merecido a atenção por parte dos pesquisadores da área.

Os estudos sobre essas e outras problemáticas a respeito da inserção da FMC são abrangentes e buscam entender o motivo dessa física não ser apresentada, de fato, aos nossos alunos, além de proporem soluções para sua aplicação, podendo ser verificados nos trabalhos de Brockington (2005), Ferreira (2004), Menezes (2000), Pessoa Júnior (2003), Pietrocola e Siqueira (2006) e Terrazan (1992).

Lucas (2012) ressalta o aumento das discussões sobre a inserção da física moderna no ensino médio, apontando os relatos de autores de livros didáticos do Plano Nacional do Livro didático para o Ensino Médio (PNLEM). Da análise dos livros escolhidos por Lucas (2012), a física moderna, em geral, tem pouco espaço e aparece nos últimos capítulos. Melhorato e Nicole (2012) salientam a presença da física moderna no cotidiano do ser humano e propõem uma aproximação com o uso de experimentos de baixo custo. Greca; Moreira; Herscovitz (2001) apresentam uma fundamentação teórica de uma proposta didática para cursos superiores de Engenharia envolvendo FMC. Custódio Pinto e Zanetic (1999) investigam inserções de FMC no EM por meio de aspectos culturais.

Greca e Moreira, (2001) realizam uma extensa revisão bibliográfica sobre MQ introdutória. Ostermann e Moreira (2000) também apresentam uma revisão de literatura sobre a FMC no EM, indicando que há a necessidade de amadurecimento em relação as proposta de ensino de FMC no EM, principalmente no que se refere a propostas testadas em sala de aula, indicando que justificativas existem, mas a inserção efetiva de elementos de FMC na sala de aula do EM, ainda é um desafio.

Estudos voltados ao papel da linguagem e da mediação textual no ensino de MQ podem ser verificados em Pereira e Ostermann (2012), que analisaram o papel da mediação textual no ensino de MQ para futuros professores, sendo explorada a forma como estes compreendem textualmente os conceitos abordados. Os autores apontam para a falta de compreensão conceitual e textual por parte dos estudantes, sendo que eles não dominam os textos explicativos usados. Aponta-se para a necessidade de se tomar consciência, da influência e importância, sobre os recursos textuais no ensino de ciências. Ainda, nesse contexto, Brockington e Pietrocola (2005) investigam como a linguagem acessível em texto científico pode facilitar a compreensão dos conceitos científicos. Paulo e Moreira (2011) exploram como a linguagem clássica pode ser usada no ensino da MQ para o ensino médio.

Nesses estudos são elencados diversos problemas, como a falta de preparo dos docentes, o formalismo matemático avançado que não faz parte do currículo do EM atual, o tratamento experimental dos temas quânticos - os experimentos, os conceitos inerentes à FMC que são distantes dos conceitos da Física Clássica, que, por sua vez apresenta-se mais inteligível, por ser apresentada de modo a parecer quase uma física do senso comum. Também há de se considerar o vestibular que, de certa forma, norteia o ensino escolar. Como os vestibulares, em geral, não cobram conteúdos de FMC, esses

saberes físicos não são levados em conta, na maioria das vezes, ao se pensar no currículo de Física para o EM.

No mais, também se constata a importância que conhecimentos básicos sobre FMC trazem ao cidadão, por permitir acesso ao mundo atual, cuja tecnologia é oriunda dos estudos na área de FMC. A respeito dessa necessidade, Terrazan (1992), alerta que:

A influência crescente dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea para o entendimento do mundo criado pelo homem atual, bem como a inserção consciente, participativa e modificadora do cidadão neste mesmo mundo define, por si só, a necessidade de debatermos e estabelecermos as formas de abordar tais conteúdos na escola de 2º grau (TERRAZAN, 1992, p. 210).

Além desses problemas, verifica-se também a dificuldade na abstração dos conceitos da FMC que, em geral, estão muito distantes daqueles conceitos clássicos. Uma pessoa que esteja empurrando um carro enguiçado, por exemplo, sabe que se tiver ajuda de outra pessoa o carro irá se deslocar com maior facilidade, e essa pessoa sabe disso pela experiência, pela prática, sem necessariamente conhecer a segunda lei de Newton, constituindo certo senso comum. Outra coisa é tentar compreender como o fato de se observar um objeto pode alterá-lo, ou como algo pode ser dual, ou seja, que uma partícula possa ser uma onda e uma onda possa ter aspectos corpusculares (PESSOA JÚNIOR, 2003), ou ainda, como um relógio em movimento pode ser mais lento que um relógio em repouso (EINSTEIN, 1999). Todas essas caracterizações são abstratas em demasia e de difícil acesso ao senso comum, constituindo verdadeiros obstáculos epistemológicos. Assim, temos que partir para novas alternativas didáticas para superar esses obstáculos (PINTO; ZANETIC, 1999).

Uma abordagem mais intuitiva e menos matemática é um caminho possível (PESSOA JÚNIOR, 2003), possibilitando o entendimento de diferentes interpretações históricas e epistemológicas plausíveis para a Teoria Quântica. A possibilidade de

atingir através de atividades diversificadas aqueles alunos que não se interessavam pela Física quando seu ensino excluía seu aspecto cultural se torna mais evidente e, desse modo, a diversidade de formas de expressão parece indicar uma maior aproximação do conhecimento Físico das atividades de interesse dos alunos (PINTO; ZANETIC, 1999).

No caminho de atingir esse interesse é que propomos uma atividade diversificada, realizada através da leitura dos três capítulos iniciais do livro *Alice no País do Quantum* (GILMORE, 1998), como ferramenta alternativa ao ensino de FMC.

Nesse contexto, entendemos que a literatura, por permitir a leitura através de narrativas e analogias, permite uma assimilação mais palatável por pessoas comuns, sem conhecimentos aprofundados nos formalismos ou “formulismos” matemáticos da FMC, que é o caso dos alunos de EM. Isso possibilita um acesso, ou porta de entrada, para inserção de tópicos de FMC. Norris et al. (2005) destacam as vantagens do uso de narrativas ao afirmarem que:

As narrativas, nesse sentido, são muito mais que meros contos, pois se tornam verdadeiros eixos norteadores ao ensino das ciências, permitindo não só a compreensão dos fenômenos científicos, mas também, as suas relações nos contextos sociais, históricos e culturais mais amplos (NORRIS et al. 2005).

A utilização da literatura, por meio das narrativas, constitui-se como importante ferramenta pedagógica para o professor, possibilitando que ele insira tópicos de FMC em suas aulas. Esse recurso contribui, inclusive, para a abstração dos saberes físicos ali contidos, uma vez que as narrativas constituem-se em uma linguagem acessível pela leitura, permitindo que os alunos, ou leitores em geral, abstraíam as cenas, os personagens, suas falas, entonações, enfim, fornecem um acesso intuitivo ao conhecimento físico mais abstrato.

A escolha dos três primeiros capítulos de *Alice no País do Quantum* se deu por opção pessoal, mas dentro de alguns critérios, como o fato de ser o início da leitura do livro, que já apresenta elementos de MQ, a partir do primeiro capítulo. Poderia, é claro, ter optado por outro tema de algum capítulo posterior, mas isso fragmentaria o início da leitura e daria uma sensação de descontinuidade ao enredo, indicando que a história ali descrita não teria importância. Assim, somente foram trabalhados os três capítulos por questão de tempo, e de foco sobre a MQ, uma vez que os demais capítulos tratam de outros tópicos da FMC.

Nossa proposta se insere, portanto, dentro dessas tentativas alternativas sugeridas, onde nossos alunos tenham um conhecimento conceitual da MQ por meio de ferramentas didáticas propiciada pela leitura.

CAPÍTULO II

2.1 A PESQUISA QUALITATIVA

Como já descrito em nossa introdução, a abordagem e escolha por uma pesquisa qualitativa nos ofereceu maior respaldo, primeiramente, porque trabalhamos com apenas uma turma de 3º ano de EM e, por entendermos que teríamos melhores condições de acompanhar o processo, nesse caso, inovador. Em segundo lugar, nossa abordagem se sedimenta como pesquisa qualitativa etnográfica, principalmente, por tratar-se de uma pesquisa-ação, onde a participação do pesquisador (professor), com sua comunidade (alunos), constitui-se em um processo de interação. Isso possibilita uma melhor inserção e compreensão da cultura do público de pesquisa e, portanto, uma vez inserido nessa cultura, possa atuar e promover mudanças. Além disso, permite desenvolver melhores estratégias de ensino, dentro do próprio processo educativo, corrigindo e alterando métodos na medida em que desenvolve o aprendizado em conjunto com seus alunos.

Conforme apontam Triviños (1987), Lüdke e André (1986), o interesse pela pesquisa qualitativa em educação vem crescendo ao longo do tempo, desde sua origem que remonta à antropologia. O seu nascimento no berço da antropologia deu-se de forma espontânea, uma vez que os antropólogos logo perceberam que muitas das informações sobre a vida e cultura dos povos não podiam ser quantificadas, necessitando-se outra abordagem que possibilitasse descrever de forma mais ampla os fenômenos reais observados. No início da década de 70, pesquisadores da área da educação começaram a fazer uso dessas abordagens, dando origem a linhas de pesquisa denominadas antropológicas ou etnográficas. Na medida em que o interesse pela

pesquisa qualitativa aumentou, tornaram-se necessárias melhores explicações e definições de termos correlatos, utilizados como sinônimos.

A dificuldade inicial de aceitação das pesquisas qualitativas logo foi substituída pelo avanço das ideias que facilitaram perspectivas diferentes de entender a realidade observada. Para Triviños (1987), a dificuldade principal era estabelecida pela dicotomia quantitativo-qualitativo, influenciada pelo enfoque positivista, que representava uma tendência do idealismo filosófico e subjetivo, constituindo-se como grande entrave à prática da pesquisa em educação, pois uma de suas características é a de considerar a realidade como formada por partes isoladas. No entanto, ao assumir a realidade isoladamente, e não como uma integração, ou melhor, uma interação de transformação dialética, o pesquisador pode incorrer em inúmeros erros, como procurar investigar fenômenos distantes da realidade cultural em que ocorriam. Assim, pesquisas sobre, por exemplo, o fracasso escolar, eram desvinculadas do dinamismo da realidade social e cultural das escolas, sendo estudadas e relacionadas com fatores como tempo de magistério dos professores, nível socioeconômico, entre outros. Ou seja, os pesquisadores realizavam suas pesquisas afastados da realidade em que ocorriam os problemas. A investigação era realizada em fatos isolados, separados e fixos, enquanto a realidade dos fenômenos que deveria ser descrita era viva e mutável.

Pode-se dizer que não houve um abandono imediato dos posicionamentos teóricos positivistas e funcionalistas pelos pesquisadores. Entretanto, a partir da origem da pesquisa qualitativa na antropologia, logo se seguiu o interesse por seu uso pelos sociólogos ao investigarem a vida em comunidades. Apenas depois dessa escalada histórica, a investigação qualitativa passou a ser utilizada pelos pesquisadores da área da educação.

Como a pesquisa qualitativa nasceu na antropologia, passou a ser conhecida como pesquisa etnográfica, uma vez que ela consiste na descrição da cultura de determinado grupo (SPRADLEY, 1979). Entretanto, como alertam Lüdke e André (1986, p. 13): *“a utilização de termos deve ser feita de forma cuidadosa, já que no processo de transplante para a área de educação eles sofrem uma série de adaptações, afastando-se mais ou menos do seu sentido original”*. Apesar do alerta, nossa tendência pende para a definição de Triviños (1987) que reconhece a pesquisa etnográfica como uma forma específica de investigação qualitativa.

Assim, uma pesquisa qualitativa apresenta alguns pressupostos apontados por Bogdan e Biklen (1982), que se resumem a cinco características básicas que ajudam a compreender a nossa escolha por esse tipo de pesquisa, conforme se apresentam em Lüdke e André (1986) e Triviños (1987):

Na pesquisa qualitativa o ambiente natural é a fonte direta de dados e o pesquisador seu principal instrumento (LÜDKE; ANDRÉ, 1986, p. 11). Nosso ambiente é a sala de aula com alunos de 3º ano do EM, e o pesquisador (professor) o instrumento de pesquisa, o que supõe o contato direto e prolongado com a realidade, o ambiente e a situação a ser investigada. A pesquisa qualitativa é descritiva. Os dados coletados são descritivos, tendo como base a descrição dos fenômenos observados pelo pesquisador (TRIVIÑOS, 1987).

Na medida em que as aulas aconteciam, e na medida em que as leituras, textos, filmes, vídeos e conteúdos eram apresentados aos alunos, buscamos descrever a percepção dos alunos, seus pseudoconceitos formados e a transposição desses em conceitos físicos, buscando, com isso, superar a percepção subjetiva do contexto, sua

aparência, através de uma dialética que nos aproximasse o máximo possível da realidade vivida.

A preocupação principal em uma pesquisa qualitativa é com o processo e não com o produto. O interesse resulta em como estudar determinado problema em sua manifestação concreta, nas atividades, procedimentos e interações cotidianas (LÜDKE; ANDRÉ, 1986, p. 12). Da mesma maneira, a preocupação principal não é a transmissão direta de conteúdos de FMC e MQ aos alunos, mas na forma, no processo, como essa transmissão se deu. Além disso, a interpretação de como as pessoas envolvidas no estudo agregam importância às coisas, às suas vidas, e ao tema de pesquisa, são focos de especial atenção do pesquisador (LÜDKE; ANDRÉ, 1986, p. 12). Em Triviños (1987) essa característica é assim explicitada:

Os significados, a interpretação, surgem da percepção do fenômeno visto num contexto. Assim, chega-se ao nível de abstração, ao conceito. Na pesquisa qualitativa com raízes no materialismo dialético, como já dissemos, o fenômeno tem sua própria realidade fora da consciência. Ele é real, concreto e, como tal, é estudado. Isto significa enfoca-lo indutivamente. Porém, ao mesmo tempo, ao descobrir sua aparência e essência, está-se avaliando um suporte teórico que atua dedutivamente, que só alcança a validade à luz da prática social. Em outros termos, o fenômeno social é explicado num processo dialético indutivo-dedutivo. E compreendido em sua totalidade, inclusive, intuitivamente (TRIVIÑOS, 1987, p. 129-130).

Nossa escolha pelo interacionismo de Vygotsky, como principal referencial teórico e apoio metodológico, associa-se a essa prática social comentada por Triviños, pois a interpretação dos alunos sobre a didatização dos conteúdos ministrados a respeito de FMC e MQ, em conjunto com as leituras utilizadas, foram observadas e anotadas por meio de instrumentos de coleta de dados.

O significado é a preocupação essencial. Os dados são analisados por um processo indutivo. Não há a preocupação em se buscar evidências comprovadoras de hipóteses antes do início dos estudos. Da análise dos dados, por um processo de baixo

para cima, nascem as abstrações e se consolidam. O significado que se busca em uma pesquisa qualitativa de caráter histórico-estrutural, dialética, refere-se à aproximação com a essência do fenômeno, onde o aluno se coloca como ser social (TRIVIÑOS, 1987).

Como eu fui o professor, que vivenciou com esses alunos a aplicação da articulação entre física e literatura, obtendo os dados descritivos, no contato direto entre pesquisador com o contexto, ou seja, na situação estudada, evidencia-se que foi enfatizado mais o processo do que o produto.

Contudo, apesar da aproximação com os pressupostos apontados por Bogdan e Biklen (1982), a definição de pesquisa qualitativa não é tarefa fácil, pois desde sua origem no campo da antropologia, a pesquisa qualitativa foi baseada pelo funcionalismo e pelo estrutural-funcionalismo, de raízes positivistas, onde se buscava, na interpretação das realidades culturais estudadas, leis com validade generalizada (EZPELETA, 1984).

A partir da década de 70 surge a pesquisa qualitativa de natureza fenomenológica, em reação ao positivismo vigente, mas de base idealista, ou seja, privilegiando-se a consciência do sujeito como formadora da prática social. Dadas as deficiências da pesquisa qualitativa de base fenomenológica, que não busca as explicações dos fenômenos em suas raízes históricas, nem leva em conta a realidade social em que acontecem, surge outro enfoque teórico de pesquisa qualitativa, denominado de pesquisa qualitativa de base materialista dialética. Tal metodologia leva em conta, também, o contexto do fenômeno social que estuda, além da prática e do propósito transformador do conhecimento que se ganha ao avaliar a realidade, buscando desvendar seus aspectos essenciais e acidentais (TRIVIÑOS, 1987).

Nesse contexto, buscamos construir nossa pesquisa como sendo qualitativa de base materialista dialética, uma vez que o nosso referencial teórico adotado, o interacionismo de Vygotsky, aproxima-se das bases materialistas e dialéticas - que serão explicadas com maior profundidade mais adiante - que entendem o real como possível de ser compreendido e não como uma subjetividade da mente, existente na pessoa longe de sua interação social, entre as pessoas e os meios. Tal escolha se justifica em Triviños, quando este afirmar que:

Estas três bases teóricas, a estrutural-funcionalista, a fenomenológica e a materialista dialética, tornam impossível uma definição da pesquisa qualitativa em termos que satisfaçam os requisitos destas direções fundamentais. Por isso, **o teor de qualquer enfoque qualitativo que se desenvolva será dado pelo referencial teórico no qual se apoie o pesquisador** (TRIVIÑOS, 1987, p. 125, grifo meu).

Outra dificuldade para se denominar uma pesquisa qualitativa surge da abrangência do enfoque qualitativo, sua generalidade e especificidade, das várias denominações existentes. Sobre essa abrangência, Triviños (1987) recorda que os enfoques qualitativos têm recebido diversas denominações, além do chamado estudo etnográfico, como:

Estudo de campo; estudo qualitativo; interacionismo simbólico; perspectiva interna; interpretativa; etnometodologia; ecológica; descritiva; observação participante; entrevista qualitativa; abordagem de estudo de caso; pesquisa participante; pesquisa fenomenológica; **pesquisa-ação**; pesquisa naturalista; entrevista em profundidade; pesquisa qualitativa e fenomenológica, entre outras (TRIVIÑOS, 1987, p.124, grifo meu).

Assim, justifica-se a nossa escolha pela pesquisa-ação. Como apontada acima, ela se constitui em um tipo de pesquisa qualitativa etnográfica. Resta-nos estabelecer o que se entende por pesquisa etnográfica. Em seu sentido mais amplo, já foi dito que ela representa o estudo da cultura de determinado povo. Entretanto, é necessário compreendermos melhor sua denominação, a fim de que possamos estabelecer melhor

nossa escolha por esse tipo de pesquisa. Nesse sentido, Wolcott (1975) apresenta alguns critérios que podem servir de parâmetros para identificar se uma pesquisa se constitui ou não em uma abordagem etnográfica. Tais critérios são apresentados resumidamente abaixo:

- i. O problema é descoberto no campo. Isto significa que o etnógrafo evita a definição rígida de hipóteses. Ele atua no meio cultural que investiga, e a partir daí vai revendo e aprimorando o problema inicial da pesquisa (WOLCOTT, apud LÜDKE; ANDRÉ, 1986, p. 14);
- ii. O etnógrafo realiza a maior parte do trabalho de campo pessoalmente. Quando o professor que leciona é o próprio pesquisador, isso se verifica facilmente. O contato é íntimo e pessoal com a realidade estudada (WOLCOTT, apud LÜDKE; ANDRÉ, 1986, p. 14);
- iii. Há a necessidade de uma longa e intensa imersão na realidade estudada para se entender suas regras, seus costumes, bem como as convenções que governam a vida do grupo estudado (WOLCOTT, apud LÜDKE; ANDRÉ, 1986, p. 14);
- iv. O pesquisador deve ter tido experiências com outros povos de outras culturas. O contraste com outras culturas facilita entender melhor o sentido que o grupo estudado atribui às suas experiências. No caso de um professor experiente, atuante no EM há anos, esse contraste se estabelece mais facilmente (WOLCOTT, apud LÜDKE; ANDRÉ, 1986, p. 14);
- v. A abordagem etnográfica combina vários métodos de coleta. Dois são os métodos mais usados, o primeiro realiza a observação direta das atividades do grupo estudado, e o segundo realiza entrevistas para captar suas explicações e interpretações do que ocorre com o grupo. O primeiro método se mostra mais apropriado, pois permite ao professor (pesquisador), inserido diretamente no

meio cultural (contexto social) de sala de aula, observar diretamente e registrar os fenômenos como ocorrem, aproximando-se de sua essência (WOLCOTT, apud LÜDKE; ANDRÉ, 1986, p. 14);

- vi. O relatório etnográfico apresenta uma grande quantidade de dados primários, além das descrições acuradas da situação estudada. Pode apresentar muito material, como histórias, canções, frases, desenhos e outros que possam vir a ilustrar a perspectiva dos alunos participantes do estudo, ou seja, sua maneira de ver o mundo e as suas próprias ações (WOLCOTT, apud LÜDKE; ANDRÉ, 1986, p. 14).

Percebe-se pelos critérios apontados acima, que nem todo estudo qualitativo pode ser chamado de etnográfico. Em nossa pesquisa, procuramos atender as orientações metodológicas acima descritas; em especial pelo fato do pesquisador (professor) estar imerso na cultura dos alunos, colocando-se como um etnógrafo que os observa de perto e por longo tempo. Como essa interação se dá no meio social escolar, resulta mesmo da realidade estudada. Ou seja, o ensino de FMC e MQ aos alunos de 3º EM, articulado e imerso no processo cultural da sala de aula, por meio da literatura, possibilitando observar como os alunos reagem a essa abordagem, conhecendo de perto suas reações, e recriando estratégias na medida em que sejam necessárias implementações ou mudanças nas aulas. Essa gama de possibilidades que uma pesquisa de linha qualitativa oferece, aproxima-se de uma pesquisa materialista dialética, o que traz a necessidade de uma explicação a respeito dessa abordagem.

2.2 A LINHA DIALÉTICA DE PESQUISA

Em busca de uma melhor compreensão sobre as bases marxistas, materialistas e dialéticas, faz-se necessário uma inserção no campo da filosofia, a fim de que possamos entender como surgiram essas bases e porque consideramo-las mais apropriadas que as bases anteriores, a saber, a estrutural-funcionalista e a fenomenológica de cunho idealista.

Uma primeira distinção entre materialismo e idealismo, como correntes opostas na filosofia, é a relação entre o ser e o pensamento, a natureza e o espírito. Tal questão fundamental apresenta-se em geral como ontológica e epistemológica. A primeira é a relação entre o ser e o pensamento, a matéria e a consciência. A segunda, relaciona a consciência e o mundo exterior, procurando entender se a nossa mente é capaz de conhecer e refletir de maneira adequada o mundo que nos cerca. Conforme os filósofos consideram essa questão fundamental, dividem-se em dois campos: aqueles que encaram a matéria como primordial, isto é, que o mundo e suas leis são cognoscíveis, possíveis de serem estudadas e entendidas, são considerados materialistas. Se pertencerem a corrente que acredita na consciência acima da matéria, são considerados idealistas.

Ao longo da história da filosofia o materialismo passou por várias etapas, como o materialismo ingênuo, mecanicista, metafísico até chegar ao materialismo dialético e histórico, que teve sua origem com Karl Marx (1818-1883) e Frederick Engels (1820-1895). O materialismo dialético, no qual a dialética e o materialismo formam um todo orgânico, permite uma análise profunda das relações entre os alunos e o conteúdo que estão aprendendo, onde o materialismo se enriquece com a dialética e a dialética é

elaborada sobre a base materialista. Sobre esse materialismo, Khlyabich (1967) o define como:

Concepção do mundo do partido marxista, criada por Marx e Engels e desenvolvida por Lenin. Chama-se materialismo dialético porque, para estudar a natureza, a sociedade humana e o pensamento, emprega o método dialético, antimetafísico e porque sua teoria filosófica é um materialismo rigorosamente científico. O método dialético e o materialismo filosófico interpenetram-se reciprocamente, acham-se indissoluvelmente ligados e constituem uma concepção filosófica coerente. Aplicando o materialismo dialético ao estudo dos fenômenos sociais, Marx e Engels fundaram o materialismo histórico, uma das maiores conquistas ao estudo da vida social (KHLIYABICH, 1967, p.164).

Como não pretendemos nos estender demais no campo da filosofia, acreditamos que a contextualização apresentada tenha sido suficiente para entender o materialismo dialético em seu contexto histórico e compreendê-lo como uma forma de pensamento que acredita nos fenômenos naturais como sendo possíveis de serem estudados. A fim de propor sugestões para uma pesquisa na linha dialética, Triviños (1987) recorda que o pesquisador que for seguir uma linha de pesquisa baseada no materialismo dialético deve compreender os princípios básicos do marxismo e, as concepções apresentadas acima, isto é, que a materialidade dos fenômenos é possível de conhecer, que existe uma realidade objetiva fora da consciência, a qual é resultante da evolução material, por fim, que a matéria é o princípio primário e a consciência o secundário. Além disso, uma investigação na área social e, principalmente na área educacional, deve levar em consideração os conceitos do materialismo histórico, em seus modos de produção, sua economia, relações de produção, classes sociais, sua cultura social, sua ideia de educação, entre outros, que são considerados implícitos na formação do investigador.

As sugestões propostas para uma linha de pesquisa dialética, que orientam o conhecimento do objeto de ensino, são assim apresentadas por Triviños (1987):

- i. A “contemplação viva” do fenômeno (sensações, percepções, representações) se constitui na etapa inicial do estudo, onde se estabelece a singularidade da “coisa”, de

que ela existe, que é diferente de outros fenômenos. Organizam-se nessa etapa as informações e materiais que auxiliem na identificação das principais características do objeto, delimitando o fenômeno e captando o objeto em sua qualidade geral;

- ii. Análise do fenômeno, isto é, a penetração na dimensão abstrata do mesmo, observando elementos ou partes que o integram a fim de estabelecerem-se as relações sócio-históricas do fenômeno, elaborando juízos, raciocínios e conceitos sobre o objeto;
- iii. A realidade concreta do fenômeno. Que significa estabelecer os aspectos essenciais do fenômeno, seu fundamento, sua realidade e possibilidades, seu conteúdo e sua forma, o que nele é singular e geral, necessário e contingente, isto é, todas as formas que possibilitem atingir a realidade concreta do fenômeno, por meio de estudo das informações, observações, experimentos, questionários, entrevistas, entre outros (TRIVIÑOS, 1987, P. 73).

É importante ressaltar que nossa opção por uma linha de pesquisa dialética se dá em um formato *soft*, como já dito na apresentação dessa dissertação, pois não pretendemos, nem temos meios de nos aprofundarmos demais nas relações sociais, históricas e de vidas de nossos alunos. Estamos, também, cientes, de que a realidade, ou seja, a relação social estabelecida entre os alunos e pelos alunos com a escola e o professor dá-se de forma diferente daquela que eles estabelecem fora do âmbito escolar, no seio da sociedade fora da escola e em seu meio familiar. Em geral, independentemente de qual realidade se trate, é possível que os alunos e os professores vivam imersos em um mundo, conforme aponta Kosik (2011), de aparências, de alienações, um mundo de fetichizações, criado principalmente, pela indústria cultural, como definida e estudada por Adorno e Horkheimer (1985).

Assim, uma profunda análise sobre essas diferentes “realidades” sociais, a escolar, a familiar etc., torna-se relevante, pois viabilizaria o entendimento a respeito do comportamento de nossos alunos, fornecendo novos subsídios pedagógicos e novas estratégias de ensino que levassem em conta essa forma de interpretar a realidade que os rodeia, porém seria inviável em uma dissertação de mestrado, além de fugir ao nosso objeto de estudo. Tal impedimento nos levou a observar e estudar suas relações sociais escolares em *stricto senso* com o conteúdo das aulas. Ou seja, o processo pelo qual os

alunos desenvolvem seu aprendizado sobre FMC e MQ por meio da literatura e seus recursos, as analogias, a divulgação científica, os filmes e vídeos. Para tanto, fez-se necessário entender e tentar explicar esse mundo de aparências, no qual, não só os jovens estudantes, mas o homem contemporâneo parece estar imerso, afastado da realidade concreta dos fenômenos.

Tal verificação foi predominante para estabelecer um contato mais próximo dos alunos, e mais próximo, inclusive, da “realidade” por eles considerada, o que tornou possível não só observar melhor sua cultura, mas inserir conteúdos de FMC e MQ, de forma que se articulasse com essa visão de mundo.

2.3 A DIALÉTICA DO CONCRETO

Compreender o público alvo de minha pesquisa, os alunos, constitui-se tarefa preliminar à inserção de qualquer estudo. Para tal compreensão exige-se, primeiro, entender o mundo em que vivem, e mais, compreender sua práxis nesse mundo, ou seja, como interpretam e agem perante a natureza das coisas que se apresentam em suas vidas cotidianas. No quarto capítulo, irei explicar alguns fatores importantes a respeito dessas questões, como idade, nível sócio econômico, compreensão da importância dos estudos, entre outros, antes de explicar a metodologia de ensino aplicada. Para tanto, é necessário definirmos, inicialmente, como o mundo real, a coisa em si, apresenta-se, de forma geral, a todos nós e, em especial, aos alunos partícipes dessa pesquisa. Nessa empreitada nos apoiaremos na *Dialética do Concreto* de Karel Kosík (2011).

Karel Kosík nasceu em Praga no ano de 1926, onde morreu em 2003. Participou ativamente da resistência clandestina antinazista, durante os anos de guerra, nas fileiras do Partido Comunista Tcheco. Entre 1947 a 1949 estudou filosofia em Leningrado e Moscou, sendo conhecido como uma das mais eminentes figuras da cultura marxista.

Publicou a *Dialética do Concreto* no ano de 1963, no qual analisou as mistificações do mundo da pseudoconcreticidade, que é o mundo da reificação, das aparências enganadoras, da alienação, dos preconceitos e da práxis fetichizada. Em tal mundo, esclarece-nos Kosík (2011), a verdade e o erro se confundem e a ambiguidade se generaliza.

Tais conceitos devem ser, então, esclarecidos, para entendermos como trabalhar com nossos alunos em sala de aula. E, apesar de já ter comentado que a nossa escolha por uma linha dialética dentro do materialismo justifica-se pelo fato de nos fornecer uma visão mais próxima, mais concreta da realidade, da essência mesma dos fenômenos estudados, sabemos que essa “realidade”, ou seja, essa essência, de fato, não nos é óbvia, não é possível de ser alcançada à primeira vista, pois ela tem dimensões ocultas e, a realidade seria, portanto, uma interação entre o fenômeno e a essência (KOSÍK, 2011).

Ao realizar sua exegese sobre o mundo da pseudoconcreticidade, Karel Kosík nos conduz ao entendimento de que a dialética trata da “coisa em si”, sendo esta oculta ao homem, isto é, essa “coisa em si” não se manifesta imediatamente ao entendimento humano. Para se chegar a sua compreensão, é necessário fazer muito esforço e, também, um desvio sobre a forma como compreendemos o que nos rodeia. Dessa maneira, salienta o autor, o pensamento dialético distingue entre representação e conceito da coisa, o que permite avaliar, principalmente, a práxis humana. De posse desses conceitos, podemos nos aproximar do intrincado processo de ensino aprendizagem, uma vez que estaremos cientes de que os conceitos físicos apresentados aos nossos alunos, sejam de forma direta e tradicional, sejam de forma alternativa, constituem-se para eles, em um primeiro contato, não como conceitos cognoscíveis, mas próximos de alguma representação e, nesse primeiro contato, certamente não os compreendem como “a coisa

em si”, a essência. E, como já citado anteriormente, na física é preciso primeiro criar e construir criteriosamente o símbolo, para só então, utilizá-lo com os alunos (MENEZES, et al. 1994).

Em sua análise, Karel Kosík nos recorda que:

A atitude primordial e imediata do homem, em face da realidade, não é a de um abstrato sujeito cognoscente, de uma mente pensante que examina a realidade especulativamente, porém, a de um ser que age objetiva e praticamente, de um indivíduo histórico que exerce a sua atividade prática no trato com a natureza e com os outros homens, tendo em vista a consecução dos próprios fins e interesses, dentro de um determinado conjunto de relações sociais. Portanto, a realidade não se apresenta aos homens, à primeira vista, sob o aspecto de um objeto que cumpre intuir, analisar e compreender teoricamente, cujo polo oposto e complementar seja justamente o abstrato sujeito cognoscente, que existe fora do mundo e apartado do mundo... Todavia, “a existência do real” e as formas fenomênicas da realidade – que se reproduzem imediatamente na mente daqueles que realizam uma determinada práxis histórica, como conjunto de representações do “pensamento comum” (que apenas por “hábito bárbaro” são consideradas conceitos) – são diferentes e muitas vezes contraditórias com a lei do fenômeno (KOSÍK, 2011, p. 14).

A práxis utilitária imediata, em conjunto com o senso comum a ela atribuída, fornece ao homem condições de se orientar na sociedade em que vive, além de familiarizá-lo com os processos de vivência desta e manejá-los em seu cotidiano. Contudo, essa práxis não possibilita a compreensão das coisas e da realidade dos fenômenos vividos, o que constitui a alienação social em que o homem vive.

Ao escrever o capítulo XVIII – *Feiticeiros e Aprendizes* - da *Era dos Extremos*, Hobsbawn (1995), comenta sobre a nova forma da práxis humana perante os avanços da ciência, não como sujeito cognoscente, mas como sujeito fetichizado historicamente. Como exemplo do cotidiano, cita o caso do operador de caixa de supermercado, diante de sensor óptico, código de barras, programas de computador, mas tão inconsciente da ciência por trás do dispositivo que opera diariamente quanto qualquer pessoa comum. A dicotomia apresentada por Hobsbawn consiste em alertar para o fato de que tanto faz conhecer a ciência por trás do equipamento ou não, pois o dispositivo, caixa do

supermercado, continuará efetuando as tarefas para as quais foi programado, quanto ao ser humano por trás do equipamento, sequer necessita realizar cálculos ordinários de soma e subtração, bastando-lhe conhecer os números cardinais, o restante a máquina faz por ele.

Esse conhecimento cotidiano é difícil de superar pela sua praticidade, na medida em que funciona e continua funcionando para resolver os problemas do dia a dia das pessoas, ele não é abandonado por outros tipos de conhecimentos, dentre os quais, o conhecimento científico e físico, o que acarreta de imediato um grande obstáculo ao aprendizado dos alunos. Essa utilidade do conhecimento acerca da vida se constitui em simples aceitação, sem questionamentos profundos, até que apareça um problema que não pode ser resolvido segundo essa práxis, daí se procura um técnico, ou especialista, pois enquanto esse “conhecimento das coisas” estiver funcionando de forma satisfatória, não se cria quaisquer dúvidas sobre sua utilidade e funcionamento (LUCKMAN; BERGER, 2008, p.56).

É claro que não se espera que cada ser humano realize cada ação de seu cotidiano de forma científica, perguntando, criando hipóteses, refletindo, pensando, especulando, experimentando antes de tomar qualquer atitude. A vida assim seria impraticável socialmente como a conhecemos, pois a vida cotidiana é espontânea. Sobre ela Lopes (1999) ressalta que:

Na vida cotidiana, nós homens e mulheres, organizamos nossas ações e as repetimos diversas vezes ao longo do tempo. De acordo com o tempo, distribuímos nossas ações organizadamente, ainda que irrefletidamente e necessária. Precisamos automatizar nossas ações, pois não seria possível refletirmos sobre cada pequena tomada de decisão cotidiana (LOPES, 1999, p.145).

Contudo, a preocupação é essa universalização do conhecimento cotidiano que devido a sua praticidade tem concepções que permeiam diferentes classes e grupos

sociais, mantendo-se resistente a mudanças. Para Lopes (1999) é necessária uma vigilância constante, a fim de se evitar as armadilhas deste tipo de conhecimento. A ruptura epistemológica, entre o conhecimento comum e o científico, proposta por Bachelard (1996), fornece-nos uma visão mais apropriada dos riscos gerados por esse tipo de pensamento. A partir do ponto em que ocorra uma descontinuidade entre o conhecimento comum ou opinião dos estudantes para o conhecimento sobre FMC e MQ apropriado, que é o assunto de nosso estudo, aí haverá uma ruptura, isto é, ocorrerá potencialmente a aprendizagem. Assim, os obstáculos epistemológicos que se apoiam sobre um conhecimento não questionado, são nada mais que elementos próprios do processo de conhecimento, são os símbolos que precisam ser criados primeiro para depois serem usados (MENEZES; KAWAMURA; HOSOUME, 1994).

Historicamente, verifica-se que os donos do capital, ou seja, os homens que determinam as condições sociais adaptam-se perfeitamente no mundo das aparências, pois podem comandar as pessoas imersas nas formas fenomênicas desligadas da sua conexão interna. Isso que se constitui em uma práxis historicamente determinada e unilateral, a práxis do senso comum já citada, baseada na divisão do trabalho, da sociedade em classes e das posições hierárquicas, constituindo nessa práxis o ambiente material do indivíduo histórico, quanto à atmosfera em que a aparência da realidade é fixada como um pseudomundo de intimidade, confiança e familiaridade em que o homem vive e age socialmente (MARX, apud KOSÍK, 2001).

O termo pseudoconcreticidade, cunhado por Karel Kosík, explica bem esse mundo de aparências, de representações fenomenológicas, que povoam o ambiente cotidiano e a vida comum da humanidade, cuja regularidade, imediatismo, pragmatismo e evidencia, enraízam-se na consciência dos indivíduos e formam o mundo das fetichizações, das aparências, das representações falsas, das alienações e das reificações.

A esse universo de pseudoconcreticidade, Kosík (2011) circunscreve como pertencentes quatro tipos de mundos:

- i. O mundo dos fenômenos externos, que se desenvolvem à superfície dos processos realmente essenciais;
- ii. O mundo do tráfico e da manipulação, isto é, da práxis fetichizada dos homens (a qual não coincide com a práxis crítica revolucionária da humanidade);
- iii. O mundo das representações comuns, que são projeções dos fenômenos externos na consciência humana, produto da práxis fetichizada, formas ideológicas de se movimento;
- iv. O mundo dos objetos fixados, que dão a impressão de serem condições naturais e não imediatamente reconhecíveis como resultados da atividade social dos homens (KOSÍK, 2011, p. 15).

O mundo da pseudoconcreticidade é, portanto, ambíguo por natureza, sendo conceituado por Kosík como:

Um claro escuro de verdade e engano. O seu elemento próprio é o duplo sentido. O fenômeno indica a essência e, ao mesmo tempo, a esconde. A essência se manifesta no fenômeno, mas só de modo inadequado, parcial, ou apenas sob certos ângulos e aspectos. O fenômeno indica algo que não é ele mesmo e vive apenas graças ao seu contrário. A essência não se dá imediatamente; é mediata ao fenômeno e, portanto, se manifesta em algo diferente daquilo que é. A essência se manifesta no fenômeno. O fato de se manifestar no fenômeno revela seu movimento e demonstra que a essência não é inerte nem passiva. Justamente por isso o fenômeno revela a essência. A atividade da essência é precisamente a atividade do fenômeno (KOSÍK, 2011, p.15).

Pelo menos três conceitos podem ser identificados, dado esse contexto. Primeiro, que o fenômeno se manifesta imediatamente aos nossos olhos, ou seja, é a “realidade” percebida diretamente pelo nosso senso comum, a qual se constitui no mundo das alienações e aparências em que vivemos, podendo criar com isso, verdadeiro obstáculo epistemológico. O mundo fenomênico não é algo independente e absoluto e, ao compreendê-lo se atinge a essência. Segundo, a essência não se manifesta imediatamente, à primeira vista, ela é oculta, para “vê-la” é preciso um desvio e muito esforço intelectual. No mundo da pseudoconcreticidade a essência é o fenômeno, para se chegar à descoberta de uma realidade, a existência de uma essência oculta são necessárias a filosofia e a ciência. E, por terceiro, constata-se que a realidade, a coisa

em si, nada mais é que a interação entre o fenômeno e a essência. A realidade, oculta pela pseudoconcreticidade, apesar de se manifestar nela, não é o mundo da realidade em oposição ao mundo da ficção, da irrealidade, tampouco a realidade não se constitui como o mundo da transcendência em oposição à ilusão subjetiva, ou do real e imaginário, simplesmente a realidade se constitui como o mundo da práxis humana.

Dessa prática, desse trabalho e esforço por se descobrir a estrutura da “coisa em si”, surge a necessidade da filosofia e da ciência, pois se os homens apreendessem imediatamente as conexões, entre o fetichizado e o real, não seria necessária a ciência para descobrir a essência das coisas, de acordo com Karl Marx (1959): “*Toda ciência se tornaria supérflua caso a forma fenomênica e a essência coincidissem diretamente*” (p. 570). Assim, o mundo das aparências se reproduz rapidamente, como formas correntes do pensamento, mas seu fundamento oculto é tarefa precípua da ciência, e somente por ela descoberto (MARX, 1959).

Para que se possa compreender o conceito da coisa, faz-se necessário conhecer sua estrutura. Para tanto, uma das características principais do conhecimento consiste na decomposição do todo, o que é possível por meio da dialética, que possibilita dar significado ao conceito e à abstração, ao reproduzir sua estrutura e possibilitar sua compreensão. A forma pela qual o pensamento pode captar a “coisa em si” se dá pela distinção entre a representação e o conceito, isto é, pela destruição da pseudoconcreticidade - assim como Bachelard (1996) indica a destruição do senso comum - para que se possa chegar a concreticidade, o que só é possível pelo pensamento dialético, onde o sujeito e o objeto não podem ser isolados; caso contrário, o caráter dialético se perde. Sobre a destruição da pseudoconcreticidade Kosík (2011) explica que se realiza através de:

- i. Crítica revolucionária da práxis humana, que coincide com o devenir humano do homem, com o processo de “humanização do homem”, do qual as revoluções sociais constituem as etapas-chaves;
- ii. Pensamento dialético, que dissolve o mundo fetichizado da aparência para atingir a realidade e a “coisa em si”;
- iii. Realizações da verdade e criação da realidade humana em um processo ontogenético, visto que para cada indivíduo humano o mundo da verdade é, ao mesmo tempo, uma sua criação própria, espiritual, como indivíduo social-histórico. Cada indivíduo – pessoalmente e sem que ninguém possa substituí-lo – tem de formar uma cultura e viver a sua vida (KOSÍK, 2011, p. 23-24).

A respeito da realização desses processos, verifica-se a necessidade de um esforço supremo, como ressalta Kosík (2011) onde: *“o homem para conhecer as coisas em si deve transformá-las em coisas para si... O homem só conhece a realidade na medida em que ele cria a realidade humana e se comporta antes de tudo como ser prático”* (p. 28). Assim, para conhecer é preciso estabelecer e submeter à coisa na práxis humana, em nosso caso específico, à práxis dos alunos, para posteriormente se verificar como são quando afastadas de sua aparência, de sua fetichização. A análise dessa atividade se estabelece entre os vários aspectos ou modos de apropriação dos conteúdos físicos pelos alunos, onde essa apropriação tem diversas interpretações, ou visões, que fluem através das mais variadas relações sociais e formas de lidar com os seus objetos.

Dessa forma, a realidade é concebida pela complexidade, em um movimento de retroação e processos anelares, onde há movimento da parte para o todo e do todo para a parte, do fenômeno para a essência e da essência para o fenômeno, isto é, a realidade é concebida como um todo indivisível de entidades e significados, onde é possível entender o sentido objetivo da essência se o homem cria para si mesmo um sentido correspondente. Assim, a práxis objetiva constitui a consciência e sua recusa leva ao irracionalismo. A práxis humana leva ao método de desenvolvimento e da explicitação dos fenômenos por meio da dialética, que se constitui não como método da redução, mas da reprodução intelectual da realidade. Portanto, a nossa investigação não deve visar diretamente a essência, antes deve levar em consideração a pseudoconcreticidade

dos alunos, para que através deste desvio se conduza ao pensamento físico adequado a respeito dos conceitos sobre FMC, com salienta Kosík (2011), ao afirmar que o conhecimento do real deve passar, antes, pela aparência fenomênica:

A investigação que visa diretamente à essência, ao deixar para trás tudo que é inessencial, como lastro supérfluo, lança dúvida quanto a sua própria legitimidade. Faz-se passar por algo que não é. Apresenta-se como pretensão de ser uma investigação científica mas considera já provado, de antemão, justamente o ponto mais essencial: a diferença entre o que é essencial e o que é secundário; vale dizer, faz uma afirmativa sem submetê-la a qualquer investigação. Ela deseja chegar à realidade não através de um complicado processo regressivo-progressivo (no curso do qual e graças a cuja atividade a realidade se cinde em essência e inessencial, ao mesmo tempo em que se justifica esta cisão), porém através de um salto que a coloca acima das aparências fenomênicas; mesmo sem examinar tais aparências, este gênero de investigação já sabe o que é essência e como alcança-la. Mas pelo próprio fato de visar diretamente ao “essencial”, ela salta por cima da essência e, perseguindo-a, acaba, ao invés, alcançando a coisa sem a essência, a abstração vazia ou a banalidade (KOSÍK, 2011, p.67).

Uma vez que estabelecemos a compreensão e a existência da pseudoconcreticidade, que existe um mundo material cognoscível, mas que antes se deve levar em consideração a aparência antes da essência podemos avaliar, numa primeira análise, que o utilitarismo com que os alunos parecem atuar sobre uma realidade aparente e superficial do mundo, ou da natureza, pode se constituir em verdadeiro obstáculo pedagógico. Sua superação é difícil e exige muito esforço, principalmente se tentarmos oferecer os conceitos sobre FMC e MQ de forma direta, buscando a essência sem levar em consideração a aparência fenomênica da sua práxis diária, o que levaria a um vazio de compreensão, um inócuo aprendizado. Talvez possamos, no máximo, fornecer modelos alternativos que possam ser usados pelos alunos diante de determinados problemas, ou propiciar que criem alegorias (analogias expandidas) sobre os fenômenos, possibilitando uma abstração cognoscente mais eficaz. Esperar que abandonem sua compreensão do mundo, construída histórica e socialmente, muitas vezes fetichizada, de representações comuns, de objetos fixados e socialmente

reconhecidos, por uma compreensão da realidade constituída por atos de pensamentos abstratos e especulativos sobre a mesma, é um convite ao vazio ou ao fracasso.

A fim de avaliarmos a forma como esse desvio sugerido por Kosík (2011) pode ser empregado em nossas aulas, é necessário investigar como os alunos criam suas representações, como eles identificam a essência, o fenômeno, e como se tornam em pseudoconceitos alternativos, que tratados didaticamente podem se transformar em conceitos científicos apropriados. Para tanto, precisamos analisar a obra de Vygotsky, em especial, suas investigações a respeito da formação de conceitos científicos, além da articulação entre o desenvolvimento do interacionismo por ele proposto com o materialismo dialético.

3. CAPÍTULO III

3.1 A OBRA DE LEV SEMIONOVITCH VYGOTSKY

Lev Semionovitch Vygotsky (1896-1936) foi um bielorrusso que revolucionou o estudo da natureza humana no século XX, sendo um dos principais fundadores da psicologia histórico-cultural. Atuou como professor e pesquisador nas áreas de psicologia, filosofia, literatura, deficiência física e mental, trabalhando em diversas instituições de pesquisa e ensino, lendo textos em diversas línguas, escrevendo e ministrando conferências.

De acordo com Oliveira e Rego (2010), Vygotsky teve uma produção rica e longa, produziu uma quantidade enorme de trabalhos, tendo escrito mais de 300 artigos científicos, que versavam desde a neuropsicologia até a crítica literária, investigando a deficiência física e mental, a linguagem, a psicologia, a educação, além de teorias metodológicas a respeito das ciências humanas. De grande originalidade investigativa, sua erudição e interesse em dialogar resultaram em um conjunto de trabalhos que o colocaram como pesquisador à frente de sua época e sua enorme e variada produção intelectual, realizada em curto período, parecia anteceder sua morte prematura por tuberculose. Seus esforços por compreender o sujeito em sua historicidade e complexidade o caracterizaram como um materialista histórico e dialético, que buscou uma forma mais ampla de investigar os processos psicológicos humanos.

Oliveira e Rego (2010) salientam que apesar de fecunda, a produção escrita de Vygotsky não constitui um sistema explicativo completo, articulado, que viabilize uma teoria vigotskiana, ou que permita extrair e obter informações precisas a respeito dos procedimentos e resultados das pesquisas que efetuou. A doença que o acometia o impedia de detalhar minuciosamente seus escritos, os quais, grande parte fora

construído oralmente e transcrito por outros. Mas, tal produção abriu caminhos desconhecidos, criados sob o regime totalitário de Stalin, o qual proibiu a publicação de suas obras por longo tempo. Apenas a partir de 1956, na reedição russa do livro *Pensamento e Linguagem*, sua produção volta à tona, sendo que, somente a partir de 1962 houve parcial conhecimento de sua produção no ocidente, chegando ao Brasil no início de 1984, sendo que atualmente o escopo de suas obras tem sido traduzido em várias partes do mundo, e devido a sua prolífera construção intelectual, densa e multifacetada, constitui, hoje, um campo de relevante interesse por diversos pesquisadores das mais diversas áreas da educação (OLIVEIRA; REGO, 2010).

Nosso principal interesse pela obra de Vygotsky, além de seu caráter materialista e dialético, e do seu estudo sobre a formação de conceitos científicos, relaciona-se ao interacionismo. Ou seja, a interação entre o indivíduo e a cultura, que para Vygotsky se traduz na relação que o indivíduo estabelece ao ser inserido em determinado meio cultural, proporcionando que ocorram mudanças no seu desenvolvimento. Em nossa pesquisa, a pesquisa-ação realizada, ou seja, a inserção do professor no seio cultural dos alunos, dentro da pseudoconcreticidade já detalhada, aliada à inserção dos alunos com a literatura e, por meio dessa, com os conceitos de FMC, constituem-se como um interacionismo, no qual o professor é um mediador, que busca a superação entre a alienação e o fenômeno, entre a fetichização e o concreto, entre o pensamento idealista e o pensamento materialista, entre o senso comum e o conceito científico do objeto de seu estudo.

Conforme Braga (2010), Vygotsky considera o desenvolvimento histórico dos processos humanos - seus planos filogenéticos (história da espécie humana) e ontogenéticos (história pessoal) - em contínua transformação e seu estudo em processo de mudança constitui o principal requisito do método dialético. A mediação se mostra

como requisito fundamental da teoria histórico-cultural em Vygotsky, onde nossas ações não são diretas, nem imediatas no mundo concreto e social, mas são indiretas ou mediadas por signos e instrumentos, através do outro, em uma relação que constitui a própria marca da consciência humana.

Ao escrever o “Manuscrito de 1929”, também denominado “Psicologia Concreta do Homem”, Vygotsky esclarece que qualquer função psicológica superior – a atenção voluntária, a abstração, a memória lógica, a formação de conceitos - é externa, isto é, baseia-se na relação social entre os indivíduos humanos, sendo que o seu desenvolvimento ocorre na relação interpsicológica e intrapsicológica do sujeito. Ou seja, primeiro no social, entre as pessoas, para posteriormente, ser compreendido em seu interior (BRAGA 2010).

Nessa perspectiva verifica-se que Vygotsky pode contribuir para o alcance de nossos objetivos, pois o método de interação por ele proposto possibilita ao professor se relacionar com o ambiente social e seus sujeitos, permitindo aos alunos se manifestarem, garantindo seu processo de compreensão em uma interação dialógica. O aluno passa a ser protagonista de seu aprendizado, respeitado em seus saberes anteriores e recebendo oportunidades de superar seu conhecimento comum, por conceitos científicos, ou, pelo menos, por conhecimentos mais próximos dos científicos. É essa interação que dará subsídio indispensável para que possamos analisar a superação dos conceitos “mal formados” por conceitos genuínos. Isso nos leva a verificar, em Vygotsky, a maneira pela qual se dá a formação de conceitos científicos em nossos alunos, os estágios pelos quais passam um conceito, antes de estar bem formado, as etapas de sua construção e a forma como podemos analisa-los em nosso estudo, o que nos leva, impreterivelmente, ao seu livro *Pensamento e Linguagem*.

3.2 – O PENSAMENTO E A LINGUAGEM

A fim de investigarmos a maneira pela qual nossos alunos desenvolveram conceitos científicos a respeito da FMC, por meio da leitura de *Alice no País do Quantum*, iremos analisar como Vygotsky estabelece a formação dos conceitos científicos nas crianças que estudou, para tanto utilizaremos do Tomo II das “*Obras Escogidas*” de Vygotsky (1994), sobre o “*Pensamiento y Lenguaje*”, bem como a tradução de seu livro *Pensamento e Linguagem* (VYGOTSKY, 2008) ¹⁶.

Vygotsky inicia o prefácio de “*Pensamiento y Lenguaje*” (1994) afirmando que o tema de Pensamento e Linguagem é uma das investigações mais difíceis e complexas da psicologia experimental e que até aquele momento de investigação ninguém havia tentado estudar sistematicamente o problema. Vygotsky afirma que para a realização desse trabalho foi necessário uma série de estudos experimentais, além de análise teórica e crítica, conforme salienta o autor:

“Por um lado, tínhamos que analisar teoricamente os dados empíricos coletados e buscar neles seu significado psicológico mais geral; tomamos como ponto de partida para resolver nosso problema o contraste dos dados da filogenia e da ontogenia e, desenvolvendo estas premissas iniciais, tentamos elaborar com os resultados experimentais uma teoria geral das raízes genéticas do pensamento e da linguagem. Por outro lado, devíamos submetê-la à análise crítica das teorias contemporâneas sobre o pensamento e a linguagem ideologicamente mais forte para, a partir dessa crítica, esclarecer os caminhos a seguir em nossa busca e estabelecer hipóteses prévias de trabalho, e para testar a orientação teórica de nossa pesquisa com as orientações que tem dado lugar as teorias predominantes na ciência atual, que são inconsistentes e necessitam ser revisadas e superadas” (VYGOTSKY, 1994, p. 11, tradução do autor).

Em relação à análise teórica, Vygotsky afirma que ela foi necessária em dois contextos: primeiro, quando trabalhou com dados em áreas de fronteira, como entre a psicologia da linguagem com a linguística, além do estudo experimental dos conceitos

¹⁶ A utilização de Vygotsky (1994) e (2008) nos fornece melhor respaldo quanto a possíveis desvios devido à tradução e interpretação da língua russa para espanhola e dessa para a língua portuguesa.

com a psicologia da educação; em outro momento, na aplicação de análises teóricas buscando integrar todos os dados experimentais de forma a conseguir formar uma teoria geral da psicologia.

Vygotsky alerta para o caráter complexo e multifacetado de seu livro, composto por uma diversidade de aspectos, mas afirma que todas as partes do trabalho se ligam entre si. Assim, após traçar um breve relato geral de sua obra, Vygotsky reflete, ciente do papel das críticas de leitores e de estudos posteriores sobre o seu trabalho, indicando a contribuição original de seu trabalho para a discussão sobre o problema abordado, enumerando as seguintes contribuições:

- i. Fornecemos provas experimentais de que os significados das palavras sofrem uma evolução durante a infância e definimos os passos fundamentais dessa evolução;
- ii. Descobrimos a forma singular como se desenvolvem os conceitos científicos das crianças, em comparação com os conceitos espontâneos e formulamos as leis que regem o seu desenvolvimento;
- iii. Demonstramos a natureza psicológica da linguagem escrita como função independente da palavra, assim como a sua relação com o pensamento;
- iv. Comprovamos experimentalmente a natureza psicológica da palavra interna e sua relação com o pensamento (VYGOTSKY, 2008, p. 2).

Próximo ao final de seu prefácio, Vygotsky ressalta que *Pensamento e Linguagem* é fruto de dez anos de trabalho ininterrupto, afirmando ter certeza da inevitável imperfeição de seu trabalho, que é um primeiro passo em uma nova direção. Mas, também, reconhece que é, sem dúvida, um avanço para a investigação sobre o pensamento e linguagem, tendo como referencia o contexto da psicologia quando se iniciou.

Embora reconheçamos a dimensão do *Pensamento e Linguagem* e a importância da palavra para a formação de significados e, conseqüentemente, para formação de conceitos como um todo, não seria de nosso interesse de pesquisa e nem caberia analisar com profundidade todas as relações dispostas na obra, simplesmente por fugirem de

nosso tema de estudo principal, que trata, especificamente, da formação de conceitos físicos.

Assim, daremos especial atenção aos capítulos 5 e 6 do *Pensamento e Linguagem*, que tratam dos processos de formação de conceitos e de conceitos científicos, o que não nos exime de considerar outras partes da obra, uma vez que, apesar de diversa e multifacetada, possui um todo congruente, principalmente em relação ao seu objetivo principal que é demonstrar as relações entre pensamento e palavra.

3.3 – OS ESTUDOS SOBRE A FORMAÇÃO DE CONCEITOS

Vygotsky (1994; 2008) inicia seu quinto capítulo, esclarecendo que há dificuldade por parte do estudioso em formação de conceitos por falta de método experimental que possibilite observar a dinâmica interna do processo. Os métodos tradicionais se dividem, de acordo com o autor, em:

- i. Método de Definição: investiga conceitos já formados na criança pela definição verbal de seus conteúdos. Negligencia a dinâmica, o desenvolvimento do processo em si, além da elaboração mental do material sensorial que dá origem ao conceito;
- ii. Método de Abstração: estuda os processos psíquicos que levam à formação dos conceitos. Negligencia o papel do símbolo (palavra) na formação dos conceitos e apresenta apenas uma simplificação de um todo mais complexo, apresentando apenas um processo parcial.

O problema apontado por Vygotsky (1994; 2008) sobre cada um desses dois métodos se resume ao fato de que neles se separa a palavra do material da percepção e

opera-se ou com uma, ou com outra, sendo insuficientes quando estudados em separados.

A solução interacionista apresentada por Vygotsky sugere unir ambos os métodos. Experimentalmente, introduz-se palavras sem sentido ao sujeito do experimento, ligando essas palavras a certas combinações de atributos para os quais não existe nenhum conceito ou palavra pronta. Tal método, ressalta Vygotsky (2008, p. 66), *“pode ser aplicado tanto a crianças como a adultos, uma vez que a solução do problema não pressupõe uma experiência ou conhecimento anteriores por parte do sujeito observado”*.

O método interacionista proposto possibilita definir um conceito não como uma formação isolada, fossilizada e imutável, mas como processo intelectual, constantemente a serviço da comunicação, do entendimento e da solução de problemas. O novo método, portanto, centra sua investigação nas condições funcionais da formação de conceitos. Sobre essa formação, Vygotsky se lembra dos estudos de Rimat, o qual conclui que a verdadeira formação de conceitos excede a capacidade das crianças, estabelecendo-se apenas a partir do final da puberdade, de acordo com esse pesquisador:

Estabelecemos terminantemente que só ao findar o décimo segundo ano da vida das crianças se manifesta um acentuado e súbito aumento da capacidade de formar sem ajuda, conceitos objetivos generalizados... O pensamento através dos conceitos, emancipado da percepção, traz à criança exigências que excedem as suas possibilidades mentais para as idades inferiores a doze anos (RIMAT, apud VYGOTSKY, 2008, P. 67).

Constata-se, pelos estudos desse autor, que os conceitos não são formados por meras conexões associativas, sendo um processo criativo e dinâmico, surgindo ao longo de uma operação complexa, que deve ser voltada para a solução de algum problema, sendo insuficientes meras ligações mecânicas entre a palavra e o objeto.

Antes de tratar dos processos que levam à formação de conceitos, Vygotsky apresenta o estado da arte sobre o tema, citando vários pesquisadores. Em resumo, as contribuições apontadas revelam que as crianças diferem dos adolescentes e adultos não pelo modo como compreendem o objetivo, mas pelo modo como suas mentes trabalham para alcançá-lo, sendo a questão principal quanto à formação de conceitos a forma pela qual essa operação se realiza. Assumindo as investigações, juntamente com seus colaboradores, Vygotsky procede a estudos em laboratório sobre o processo da formação de conceitos em suas várias fases evolutivas, utilizando o método desenvolvido por Sakharov (VYGOTSKY, 2008, p. 70-72). Tal abordagem é representada pela dupla estimulação, onde dois conjuntos de estímulos são apresentados ao sujeito observado, um como objeto da atividade, e outro, como signos que podem servir para organizar essa atividade.

Esse método se resume a apresentar o problema ao sujeito de imediato e ir dando possibilidades de encontrar a resposta ao longo do estudo. As descobertas principais dos estudos elaborados por Vygotsky (2008) e seus colaboradores são assim resumidas (p.72): o desenvolvimento dos processos que acabam por gerar a formação dos conceitos começa durante as fases mais precoces da infância, mas as funções intelectuais que, em determinadas combinações formam a base psicológica da formação dos conceitos, amadurecem, tomam forma, e desenvolvem-se apenas durante a puberdade. Antes dessa idade encontram-se certas formações intelectuais que desempenham funções semelhantes aos dos conceitos genuínos que mais tarde aparecem. Relativamente à sua composição, estrutura e funcionamento, esses equivalentes funcionais dos conceitos têm uma relação com os verdadeiros conceitos que é semelhante à relação entre o embrião e o organismo completamente desenvolvido.

Equiparar ambos seria ignorar o lento processo de desenvolvimento entre a fase inicial e a fase final.

Nessa perspectiva, a formação de um conceito se constitui como atividade complexa, onde todas as funções intelectuais são necessárias, porém insuficientes se não se utiliza do signo, da palavra, cuja utilização é causa psicológica da transformação radical pela qual passa o processo intelectual no início da adolescência. Isso permite delinear o seguinte questionamento: Quais caminhos constituem a formação de um conceito? Vygotsky (1994, 2008) responde que todas as funções psíquicas superiores (atenção deliberada, memória lógica, abstração) são processos mediados que levam à formação dos conceitos. Os signos constituem o meio básico para dominar e dirigir essas funções; o signo mediador é incorporado à sua estrutura como uma parte indispensável; na verdade é a parte central do processo como um todo e, na formação de conceitos, esse signo é a palavra, que desempenha papel de meio na formação de um conceito e, posteriormente, torna-se o seu símbolo.

3.4 AS ETAPAS DE FORMAÇÃO DE UM CONCEITO

Na busca da trajetória da formação de conceitos, Vygotsky (1994, 2008) demonstra as fases e subdivisões da forma como aparecem os conceitos, quando foram estudados pelo método já citado da dupla estimulação de Sakharov, lembrando que, “*a formação de conceitos é o resultado de uma atividade complexa, em que todas as funções intelectuais básicas tomam parte*” (VYGOTSKY, p. 72-73).

Nesse tópico iremos, então, relatar brevemente esses estágios, a fim de averiguar a dimensão e complexidade pelas quais passam um conceito antes de estar finalizado, buscando aprender a direcionar os próprios processos mentais com a ajuda de palavras

como parte integrante do processo de formação de um conceito. As etapas ou estágios de formação de conceitos são assim descritos por Vygotsky:

1º Agregação desorganizada ou “amontoado” que forma uma imagem instável. Aqui, o significado das palavras representa para a criança nada mais que um conglomerado vago e sincrético de objetos isolados que, de uma forma ou outra, constituíram alguma imagem vaga na sua mente. Permitem apenas manifestar o pensamento por tentativa e erro que levam a organizar o campo visual da criança e, no máximo, permitem que a criança recombine elementos numa agregação de amontoados. Esse estágio foi denominado de sincretismo, termo cunhado por Claparèd e, também, chamado de coerência incoerente, cunhado por Blonski (VYGOTSKY, 2008, p. 74-75).

2º Pensamento por Complexos, onde os objetos isolados são associados na mente da criança, não apenas pela subjetividade em sua mente, mas também devido às relações que existem entre os objetos, possibilitando uma aquisição conceitual de nível mais elevado. No fundo, um complexo é um agrupamento concreto de objetos unidos por ligações factuais, necessita de unidade lógica, uma vez que não é formado no plano do pensamento lógico abstrato. Assim, qualquer conexão factual presente pode levar à inclusão de determinado elemento por complexo, o que constitui a principal diferença entre um complexo e um conceito (VYGOTSKY, 2008, p. 77). São cinco os tipos de complexos que evoluem e se sucedem uns aos outros.

a) Complexo Associativo - baseia-se em qualquer relação percebida entre o objeto e a amostra, que não necessariamente seja, por exemplo, mesma cor ou tamanho, podendo ser qualquer outra semelhança, contraste ou proximidade espacial. O nome próprio do objeto é substituído pelo nome do grupo de objetos relacionados (VYGOTSKY, 2008, p. 77);

b) Complexo de Coleções – constitui-se nas relações entre os objetos observados na experiência prática, constitui um agrupamento de objetos com base em sua participação na mesma operação prática, em sua cooperação funcional. Até os adultos se referem a conjuntos ou coleções quando pensam, por exemplo, em louças ou roupas, ou seja, pensam em objetos concretos, ao invés de conceitos generalizados (VYGOTSKY, 2008, p. 78-79);

c) Complexo em Cadeia – é considerado como a mais pura forma do pensamento por complexos, uma vez que permite a existência de relações entre elementos isolados. Constitui-se numa junção dinâmica e consecutiva de elos isolados numa única corrente, com a transmissão de significados de um elo para outro. Entretanto, não há coerência quanto ao tipo de conexão ou quanto ao modo de articulação entre os elos com o que precede ou com o que vem a seguir. Por exemplo, uma criança se depara com uma mostra original constituída por um triângulo amarelo, passa então a escolher alguns blocos triangulares até que sua atenção a leva a escolher uma cor azul de um bloco e passa, então, a selecionar blocos azuis de qualquer formato (VYGOTSKY, 2008, p. 79-80);

d) Complexo Difuso – caracterizado pela fluidez do próprio atributo que une os seus elementos, sendo indefinidos e quase ilimitados, baseados em atributos vagos, irreais e instáveis. Uma criança que, por acaso, escolhe uma cor azul, passa a uma amarela, depois a uma vermelha e assim por diante. Assim, os grupos de objetos, ou imagens concretas, são formados por conexões difusas e indeterminadas (VYGOTSKY, 2008, p. 81);

e) Pseudoconceito – considerado como a ponte entre os complexos e o estágio final e mais elevado do desenvolvimento da formação de conceitos, constituindo o elo de

transição entre o pensamento por complexo e a verdadeira formação de conceitos. Para Vygotsky, um dos maiores obstáculos para análise genética do pensamento é a semelhança externa entre o pseudoconceito e o conceito real, pois possuem uma equivalência funcional, uma vez que a criança aprende cedo várias palavras, cujo significado é o mesmo para o adulto. Contudo, tal equivalência gera uma concepção errônea, uma vez que o conceito não é fornecido pronto para criança. Para chegar a um conceito genuíno há a necessidade de um processo de desenvolvimento (VYGOTSKY, 2008, p. 82-83).

Dessa forma, verifica-se que o pensamento por complexos tem por objetivo estabelecer elos e ligações, possibilitando a criação de uma base para generalizações futuras. Apesar da estrutura verticalizada apresentada acima, esses complexos são recorrentes, não seguem uma linearidade de desenvolvimento do pensamento, podendo transitar entre eles até uma forma mais elevada de pensamento, que possibilite a formação de um conceito. Nesse sentido, Vygotsky lembra que:

O conceito desenvolvido pressupõe algo além da unificação. Para formar esse conceito é necessário abstrair, isolar elementos, e examinar os elementos abstratos separadamente da totalidade da experiência concreta de que fazem parte. Na verdadeira formação de conceitos, é igualmente importante unir e separar: a síntese deve combinar-se com a análise. O pensamento por complexos não é capaz de realizar essas duas operações. A sua essência mesma é o excesso, a superprodução de conexões e a debilidade da abstração (VYGOTSKY, 2008, p.95).

Assim, Vygotsky indica a importância da abstração na formação de um conceito genuíno, que dentro do processo de desenvolvimento conceitual, percorre, antes, outras etapas. É comum que no início, a abstração de determinado grupo de atributos se revele, apenas, como uma impressão vaga e geral sobre semelhanças pertencentes aos objetos, mas representa o caminho do pensamento até seu estágio puro final.

A fim de perscrutar melhor a importância da abstração no processo de desenvolvimento e construção de um conceito verdadeiro, chamamos a atenção para a terceira etapa ou estágio desse desenvolvimento conceitual, proposto por Gross (2008, apud VYGOTSKY, p.96) e denominado como conceito potencial, que, em suma, é um precursor dos verdadeiros conceitos.

3º Pré-Conceito – definido como um pensamento por *Conceitos Potenciais* representa uma espécie de “abstração” isolante da natureza muito primitiva, verificada, através de treinos, tanto em crianças, quanto em animais. Nesse pensamento, não há operação mental superior; os conceitos abstratos são geralmente traduzidos em uma linguagem de ação concreta. Apesar de no pensamento por complexos também haver alguma “abstração” de traços comuns, como, por exemplo, nos complexos associativos, nos conceitos potenciais a diferença é que um traço abstraído não se perde facilmente entre outros traços, como na associação. Conforme Vygotsky (2008, p. 98), *“apenas o domínio da abstração, combinada com o pensamento por complexos em sua fase mais avançada, permite à criança progredir até a formação dos conceitos verdadeiros”*. Torna-se necessário que traços abstraídos sejam sintetizados ao longo do processo de pensamento, para que seja possível utilizar essa síntese final na formação de um conceito.

Vygotsky ressalta que enquanto o uso dos conceitos potenciais se tornam constantes no processo intelectual dos adolescentes, as outras formas mais primitivas de pensamento, anteriormente relatadas como sincréticas e por complexos, vão desaparecendo, apesar de operarem ainda por muito tempo. Para o adolescente, o uso de um conceito em uma situação concreta é fácil, porém difícil quando se solicita que expresse esse conceito em palavras. Mais difícil, ainda, se solicitado a definir um conceito quando este não se encontra mais em uma situação concreta, ou seja, definir

um conceito em um plano puramente abstrato, como por exemplo, se solicitado a definir o que é um campo elétrico. Para Vygotsky (2008, p. 99): “*A análise da realidade com a ajuda de conceitos precede a análise dos próprios conceitos*”. Dessa forma, Vygotsky anuncia o último estágio do processo pelo qual o pensamento chega à formação de um conceito: a abstração.

4º Abstração - a abstração é considerada como uma das funções psíquicas superiores, juntamente com a atenção deliberada, a memória lógica e a capacidade de comparar e diferenciar representa uma capacidade mental que só tem início a partir da adolescência; é a principal responsável pela formação de conceitos.

Em seus experimentos, Vygotsky relata que o adolescente ao se deparar com determinado problema conceitual, opera com o nome, a definição verbal, como se fosse um conceito, porém define-o como um complexo, enumerando simplesmente os diferentes objetos aos quais o conceito se aplica em determinado contexto. Tal procedimento demonstra uma forma de pensamento que oscila entre o conceito e o complexo, que para Vygotsky indica o período de crise e transição, característicos da fase do adolescente.

Ao finalizar o quinto capítulo do *Pensamento e Linguagem*, Vygotsky (1994, 2008) salienta um fato novo, porém de relevância fundamental. Resumido pela dificuldade do adolescente de aplicar um conceito apreendido e formulado em nível abstrato, em novas situações concretas que necessitem ser formulados nos mesmos termos abstratos, indicando que essa superação é: “*um tipo de transferência que em geral só é dominado no final da adolescência. A transição do abstrato para o concreto mostra-se tão árdua para o jovem quanto a transição primitiva do concreto para o abstrato*” (VYGOTSKY, 2008, p. 100; p. 115, grifo meu).

As conclusões gerais a que chega Vygotsky, ao investigar as etapas de formação de um conceito, indicam haver complexidade na formação dos conceitos, isto é, não obedece a um sistema lógico, definido e linear. É recorrente, o processo é anelar, dentro de um movimento do pensamento que oscila entre o particular e o geral e entre o geral para o particular. Lembrando-se que o pensamento complexo (FIEDLER-FERRARA, 2010) se preocupa em refletir sobre os fenômenos onde interagem muitos fatores, onde se combinam princípios de regulação e de desequilíbrio, onde comparecem contingências e determinismo, criação e destruição, ordem e desordem, onde podem ser identificados níveis de organização e dinâmicas não lineares marcadas por aquilo que se chamam retroações entre esses níveis.

Assim, meras associações não formam um conceito, sendo necessário que haja uma operação intelectual em que todas as funções mentais estejam envolvidas na combinação das partes com o todo e do todo com as partes. Isso se torna possível pelo uso das palavras como elemento para ativar e estabelecer as funções psíquicas superiores, como a atenção, a memória lógica e abstração de determinados fatores, que depois de sintetizados se tornam símbolos por meio de um signo, o que permite ao adolescente utilizá-lo em operações abstratas futuras.

Por meio desse processo, acreditamos evidenciar a tarefa árdua que leva à construção de um conceito genuíno. Que dificuldades e limites de capacidade intelectual, devido à idade, passam nossos adolescentes ao se depararem com os conteúdos científicos na escola? Torna-se evidente a necessidade de se construir, primeira e criteriosamente o símbolo, para depois utilizá-lo em um processo de ensino e aprendizagem. Nesse contexto, torna-se necessário verificar, também, como se formam os conceitos científicos.

3.5 O DESENVOLVIMENTO DOS CONCEITOS CIENTÍFICOS

Na introdução do sexto capítulo do Pensamento e Linguagem, Vygotsky (2008, p. 103) questiona, “*O que acontece na mente da criança com os conceitos científicos que lhe são ensinados na escola? Qual é a relação entre a assimilação da informação e o desenvolvimento interno de um conceito científico na consciência da criança*”?

Ao buscar uma resposta a essas indagações, o autor, como de costume, começa analisando os trabalhos existentes sobre o seu problema de pesquisa. Afirmar existir duas escolas de pensamento. A primeira, acredita que o processo de formação de conceitos científicos não passa por qualquer processo de desenvolvimento, sendo absorvidos já prontos por meio de assimilações diretas. A segunda, não nega a existência de um processo de desenvolvimento na mente do aluno, contudo, esse desenvolvimento é abordado como o mesmo dos conceitos formados pela experiência cotidiana. Em seguida, Vygotsky (1994, 2008) passa a demonstrar as falhas existentes nessas duas escolas de pensamento.

Sobre a primeira incoerência apontada, a respeito da primeira escola de pensamento, refere-se ao entendimento de que o conceito é mais do que a soma de conexões e associações, sendo um verdadeiro ato real e complexo de pensamento que, segundo Vygotsky:

... Um conceito é um complexo e genuíno ato de pensamento, que não pode ser ensinado pelo constante repisar, antes pelo contrário, só pode ser realizado quando o próprio desenvolvimento mental da criança tiver atingido o nível necessário. Em qualquer idade, um conceito encarnado numa palavra representa um ato de generalização. Mas o significado das palavras evolui e, quando a criança aprende uma nova palavra, o seu desenvolvimento mal começou: a princípio a palavra é uma generalização do tipo mais primitivo; à medida que o intelecto da criança se desenvolve é substituída por generalizações de tipo cada vez mais elevado – processo este que acaba por levar à formação dos verdadeiros conceitos. O desenvolvimento dos conceitos, dos significados das palavras, pressupõe o desenvolvimento de muitas funções intelectuais: atenção deliberada, memória lógica, abstração, capacidade para comparar e diferenciar. Estes processos psicológicos complexos não podem ser

dominados apenas através da aprendizagem inicial. [...] A experiência prática mostra também que **é impossível e estéril ensinar os conceitos de uma forma direta**. Um professor que tenta conseguir isto, geralmente não obtém qualquer resultado, habitualmente mais não consegue da criança do que um verbalismo vazio, um psitacismo que simula um conhecimento dos conceitos correspondentes, mas que na realidade só encobre um vácuo (VYGOTSKY, 2008, p. 104, grifos meus).

Verifica-se, em uma primeira análise, que a tentativa de se ensinar de forma direta novos conceitos aos alunos, constitui uma incoerência que pode ser, inclusive, constatada ainda em nossa época. Não será difícil analisar, na grande maioria dos livros didáticos de física, seja de EM ou Ensino Superior (ES), essa persistência, que repercute claramente na sala de aula por parte do professor, uma vez que sua ação, muitas vezes, não passa da reprodução dos conteúdos existentes nesses livros, assim como da ideologia destes. Parece que não há a percepção desse método inócuo, pois a física ainda hoje é ensinada por repetição de exercícios (BRASIL, 1998). A noção de obstáculo pedagógico (BACHELARD, 1996) ainda é desconhecida pelos professores, que, geralmente, insistem em inserir conceitos novos, palavras novas, aos alunos de forma direta, sem contextualizar, procurar analogias, ou indagar a respeito de paralelos construídos pelo senso comum, que fazem parte do cotidiano dos alunos.

Como exemplo, pensemos na palavra superposição. Pensemos agora em um professor em uma sala de aula de EM explicando a estranheza da superposição quântica, juntemos a esta palavra outras como colapso de onda, medição quântica etc. A linguagem nesse exemplo se torna um problema crucial, pois além de poder se tornar entediante para os alunos, tais conceitos não têm significado, são palavras vazias, pois não pertencem aos conceitos prévios (BACHELARD, 1996) desses alunos.

Ao inserirmos a literatura, a leitura das narrativas (GILMORE, 1998) ali presente pode contribuir em vários aspectos no propósito de dar significado às palavras novas. Isso permite inicialmente, criar certo “laço”, ou aceitação, levando a certo

entendimento conceitual, um pré-conceito, ou conceito potencial, possibilitando abstrair informações sobre a FMC pela leitura fictícia para que, posteriormente, o aluno possa resgatar esses conhecimentos e palavras novas ali adquiridas, passando a compreender a natureza da superposição quântica¹⁷.

Tal é a importância de se evitar ensinar novos conceitos de forma direta aos alunos que Vygotsky se empenha em comprovar essa inutilidade, citando Tolstoy:

Quando houve ou lê uma palavra desconhecida, numa frase quanto ao resto compreensível, e depois a lê noutra frase, começa a fazer uma vaga ideia do novo conceito; mais tarde ou mais cedo sentirá... necessidade de usar a palavra – e uma vez que a use, passa a assenhorear-se da palavra e do conceito. Mas estou convencido de que é impossível transmitir deliberadamente novos conceitos ao aluno... tão impossível e fútil como ensinar uma criança a andar apenas pelas leis do equilíbrio ... (TOLSTOY, apud, VYGOTSKY, 2008, p 105).

As narrativas utilizadas para o ensino de MQ contribuem para um ensino horizontal e problematizador e difere do ensino frequentemente verificado. Ou seja, da educação bancária tradicional vista na maioria dos casos, seja no ensino básico, seja no superior, onde o educando se vê minimizado ao máximo, sem participação, sendo um mero receptor de informações. Sobre essa educação Paulo Freire (1975) destaca que:

Nela, o educador aparece como seu indiscutível agente, como seu real sujeito, cuja tarefa indeclinável é “encher” os educandos dos conteúdos de sua narração. Conteúdos que são retalhos da realidade desconectados da totalidade em que se engendram e em cuja visão ganhariam significação. **A palavra nessas dissertações se esvazia da dimensão concreta que devia ter ou se transforma em palavra oca, em verbosidade alienada e alienante.** Daí que seja mais com que significação e, assim, melhor seria não dizê-la (FREIRE, 1975, p.65, grifo meu).

Esse tipo de educação não serve aos propósitos de nossa pesquisa, pois não apresenta características de transformação e de reflexão. Ao contrário, permite ao aluno

¹⁷ Um exemplo do uso de narrativa sobre superposição pode ser encontrado no anexo I, Gilmore (1998, p. 59-61) no livro *Alice no País do Quantum*, onde o personagem *Mecânico* explica à *Alice* a superposição de estados.

somente memorizar o conteúdo que lhes é depositado como se eles não passassem de folha em branco, onde o professor ali preenche com sua falácia, impondo a execução de listas de exercícios por repetição, sem jamais dialogar com os alunos para se aprofundar em seus conceitos pré-concebidos, os pseudoconceitos (Vygotsky 2008) e, assim, torna o ensino de física sem sentido. Forma alunos autômatos em resolução de exercícios, porém vazios em conceitos científicos adequados. Um professor que age nessa linha de pensamento não tem como conhecer os obstáculos conceituais de seus alunos, muito menos de superá-los.

Já, uma proposta de educação adequada aos propósitos de um ensino sobre FMC, de maneira a permitir ao aluno ser mais que um mero espectador, que o transforme em participante e protagonista de seu próprio desenvolvimento educacional, de sua própria aprendizagem, possibilitando construir seus conceitos científicos, é lançada por Paulo Freire em sua educação problematizadora:

Nesse sentido, a educação libertadora, problematizadora, já não pode ser o ato de depositar, ou de narrar, ou de transferir, ou de transmitir “conhecimentos” e valores aos educandos, meros pacientes, à maneira da educação bancária, mas um ato cognoscente. Como situação gnosiológica, em que o objeto cognoscível, em lugar de ser o término do ato cognoscente de um sujeito, é o mediatizador de sujeitos cognoscentes, educador de um lado, educandos de outro, a educação problematizadora coloca, desde logo, a exigência da superação da contradição educador-educandos. Sem esta, não é possível a relação dialógica, indispensável à cognoscibilidade dos sujeitos cognoscentes, em torno do mesmo objeto cognoscível (FREIRE, 1975, p. 78).

Freire acreditava que a educação não pode nem deve ser uma via de mão única. Ela deve partir do diálogo, numa relação em que o aluno e professor são iguais, sujeitos do aprendizado, onde o conhecimento:

Exige uma presença curiosa do sujeito em face do mundo. Requer sua ação transformadora sobre a realidade. **Demanda uma busca constante. Implica invenção e reinvenção.** Reclama a reflexão crítica de cada um sobre o ato mesmo de conhecer, pelo qual se reconhece conhecendo e ao reconhecer-se assim percebe o “como” de seu conhecer e os condicionantes a que está submetido seu ato (FREIRE, 1971, p.27, grifo meu).

Partindo dessa construção dialógica de ensino é possível respeitar o conhecimento prévio adquirido pelo estudante em sua prática diária e experiência de vida social e familiar. Nela, esse conhecimento pessoal assume uma importância tamanha quanto à própria experiência do professor e a educação passa a ser uma troca de saberes, onde o professor, ao trabalhar com as leituras, passa a ter uma ferramenta pedagógica que irá proporcionar maior facilidade em localizar os obstáculos ao aprendizado de MQ por parte dos alunos.

A leitura proporcionará acesso mais suave aos conteúdos da FMC, permitindo transformar o conceito vulgar em conceito científico aceitável e palpável ao aluno de forma a aderir ao novo ensinamento a respeito de MQ, construindo seus conceitos científicos. Nesse sentido, Bachelard (1996), recorda que, *“parece que nenhuma experiência nova, nenhuma crítica pode dissolver certas afirmações primeiras. No máximo, as experiências primeiras podem ser retificadas e explicitadas por novas experiências (p.52)”*.

Nesse sentido, as experiências primeiras formadas pela leitura podem ser transformadas por um desvio no ensino direto de conceitos físicos, pois verificamos, a partir de Vygotsky e Freire, a importância dada à linguagem no estudo da FMC. As ciências construíram suas próprias linguagens, plenas de símbolos e códigos. As linguagens são sistemas simbólicos, com os quais recortamos e representamos o que está em nosso exterior, em nosso interior e na relação entre esses âmbitos; é com eles também que nos comunicamos com os nossos iguais e expressamos nossa articulação com o mundo. O desenvolvimento da linguagem física pode ser obtido, não diretamente, pois se tornaria palavra oca, conforme Vygotsky (2008), contudo ao trabalharmos as narrativas presentes na literatura de ficção, estaremos proporcionando

aos alunos um acesso a essa linguagem de forma indireta, mais suave e prazerosa, possibilitando uma aceitação posterior para tratamento formal dos conteúdos físicos sobre FMC ali contidos.

Continuando sua crítica a respeito, agora, da segunda escola de pensamento de sua época, Vygotsky (2008) nos esclarece que o principal erro contido na concepção de que o desenvolvimento interno de conceitos científicos pelos alunos seja igual a sua experiência cotidiana, reside no fato de que o conhecimento sistemático necessite de escolarização. Ou seja, não se aprende conceitos científicos por meio de experiências cotidianas. Aprende-se apenas na escola com o ensino formal, onde esse tipo de desenvolvimento intelectual pode ser levado à abstração necessária à geração de um verdadeiro conceito científico.

Acerca dessas formações, Vygotsky investiga os chamados *conceitos espontâneos*, que seriam aqueles formados pelos próprios esforços mentais dos alunos, e os chamados *conceitos não espontâneos*, que seriam os conceitos influenciados pelos adultos. Criticando Piaget, por não conseguir ver a interação entre esses dois tipos de conceitos e os elos que os unem, demonstrando como o ponto mais fraco da teoria piagetiana, tanto em termos teóricos quanto práticos, seria o fato de não se levar em consideração a socialização do pensamento existente na aprendizagem escolar. A esse respeito, Vygotsky (2008) propõe um elo interacionista entre os conceitos espontâneos e os não espontâneos, identificando que se relacionam e se influenciam constantemente, constituindo, os dois, um único processo que leva ao desenvolvimento da formação de conceitos.

Preocupando-se com a questão metodológica, Vygotsky (2008) passa a investigar uma maneira de criar um método que utilize os resultados já obtidos pelos

dois métodos anteriores (o espontâneo e o não espontâneo), verificando ser o estudo dos conceitos científicos a abordagem mais promissora, principalmente a socialização existente no ensino e na aprendizagem em sua aquisição. Assim, seus experimentos mostram que é durante o início do aprendizado escolar que nascem, como embriões, as funções intelectuais superiores, que mais tarde resultaram na aquisição de um conceito científico. Ressalta o fato de que certas operações mentais só são possíveis de serem manipuladas quando somos capazes de dominá-las. Estabelece que os conceitos científicos, por meio de seu sistema hierárquico de inter-relações, parecem formar o meio pelo qual a consciência e o domínio se desenvolvem, para, mais tarde, serem transferidos para outros conceitos e outras áreas do pensamento, ou seja, estabelece que a consciência reflexiva surge por meio dos conceitos científicos.

Nessa perspectiva, Vygotsky (2008) chega à conclusão de que um conceito submete-se à consciência e ao controle deliberado somente quando começa a fazer parte de um sistema. E, explica que a consciência como generalização leva a formação de um conceito supra ordenado, que, por sua vez, inclui o conceito dado específico. Já o conceito supra ordenado leva à existência de conceitos subordinados, o que pressupõe uma hierarquia de conceitos de diferentes níveis de generalização. Assim se estabelece um sistema. Vygotsky nos explica que os conceitos científicos adquiridos na escola possuem relação com um objeto, que é mediada por outro conceito:

Assim, a própria noção de conceito científico implica uma certa posição em relação a outros conceitos, isto é, um lugar dentro de um sistema de conceitos. É nossa tese que os rudimentos de sistematização primeiro entram na mente da criança, por meio do seu contato com os conceitos científicos, e são depois transferidos para os conceitos cotidianos, mudando sua estrutura psicológica de cima para baixo (VYGOTSKY, 2008, p. 116).

A apropriação desses conceitos abstratos é o que leva ao domínio de um conceito científico, é o que permite generalizar fenômenos para outras áreas do

conhecimento. Vygotsky (2008) nos relata a dificuldade dos estudantes em abstrair, principalmente quanto à escrita, pois os motivos para escrever são mais intelectualizados, necessitam de um rigor, de uma sistematização, que é mais distante da necessidade imediata, a saber, a fala. Ao escrever criamos situações ou representações, exigindo-se abstrair-se do mundo real. A escrita exige, de quem o faz, um domínio da consciência para que se faça uso adequado dos símbolos necessários à sua existência. Vygotsky (2008), em seus experimentos constata que os alunos tem uma habilidade enorme em atividades espontâneas e inconscientes, como a fala, mas apresentam enormes dificuldades e falta de habilidade para atividades abstratas, deliberadas, como a escrita. Como causa dessa problemática, indica-se a imaturidade natural dos estudantes, uma vez que o aprendizado de conceitos científicos exige, como já discutido no item anterior, funções psíquicas superiores que só se estabelecem de fato ao final da puberdade e início da vida adulta.

Isso levou Vygotsky a investigar a relação temporal entre os processo de aprendizado e o desenvolvimento das funções psicológicas correspondentes, uma vez que o aprendizado geralmente precede o desenvolvimento. Ou seja, o aluno se depara com um conceito científico, ou lhe é exigido trabalhar com conceitos científicos abstratos, antes que seu desenvolvimento psicológico natural tenha se estabelecido. A esse respeito, Vygotsky ressalta o fato de que:

Quando a criança aprende alguma operação aritmética ou algum conceito científico, o desenvolvimento dessa operação ou conceito apenas começou. O nosso estudo mostra que a curva do desenvolvimento não coincide com a curva do aprendizado escolar; em geral, o aprendizado precede o desenvolvimento (VYGOTSKY, 2008, p.127).

Com isso, Vygotsky (2008) descobre que o desenvolvimento intelectual não é compartimentado de acordo com tópicos, ou conteúdos, do aprendizado. Seu percurso é

muito mais unitário, sendo que as diferentes matérias escolares interagem contribuindo nesse aprendizado em algum momento futuro, quando o aluno tenha maior maturidade.

Nesse contexto, torna-se relevante lembrar que o excessivo recurso de se ensinar física por meio de exercícios mecânicos de repetição, que não exijam mais que aplicar determinadas equações, traduz-se em direcionar o aprendizado para os pontos fracos dos alunos, impedindo e atrasando o desenvolvimento de suas funções psíquicas superiores. Por outro lado, a apresentação da física, em um contexto cultural mais amplo, pode propiciar a esses mesmos alunos que criem seu aprendizado baseado em seus pontos fortes, onde determinados alunos que gostem mais da parte matemática aprendam, e os demais, diga-se de passagem, a grande maioria, que não apreciam a matemática, possam encontrar outros recursos para o desenvolvimento de seu aprendizado em física.

Por fim, os estudos de Vygotsky (2008) a respeito do desenvolvimento dos conceitos científicos, indicam que é a ausência de um sistema, ou seja, a diferença psicológica principal que distingue os conceitos espontâneos dos conceitos científicos. A disciplina formal dos conceitos científicos transforma gradualmente a estrutura dos conceitos cotidianos e ajuda a organizá-los no necessário sistema, o que promove o estudante para níveis mais elevados de desenvolvimento. Conclui, também, que a generalização dos conceitos científicos apreendidos para situações diversas ocorre por meio de uma superação dos elos estruturais, o que ocorre com a passagem para um plano de maior generalidade, que contenha e possa reger ambas as generalizações. Apesar das relações complexas internas, entre os conceitos cotidianos e os conceitos científicos, verifica-se que os conceitos científicos são produto do aprendizado escolar.

Como limitações sobre o estudo do desenvolvimento dos conceitos científicos, Vygotsky (1994; 2008) alerta que realizou sua pesquisa em uma categoria apenas – os conceitos das ciências sociais – e sugere para futuras pesquisas abranger conceitos de várias áreas do aprendizado escolar, comparando-as com um conjunto de conceitos cotidianos correlatos.

Além disso, torna-se relevante salientar que Vygotsky (2008) em *Pensamento e Linguagem* indica as passagens da formação de conceitos findando-as com a abstração, como último e mais importante estágio para formação de um conceito genuíno, mas não trata especificamente da abstração. Como abstrair? Como fornecer elementos para os alunos desenvolverem sua abstração? Tal questionamento constitui uma lacuna ainda não preenchida.

Em nosso próximo capítulo, apresentaremos uma ferramenta de ensino que poderá propor uma alternativa para essa questão, possibilitando aos discentes o desenvolvimento de suas funções psíquicas superiores, através de seu aprendizado formal.

Dada a importância da abstração, como principal responsável para formação de conceitos, analogamente, a abstração científica se torna fundamental para formação de conceitos científicos. Khlyabich (1967) assim define e explica a abstração científica:

Operação por meio da qual a nossa mente, depois de distinguir os caracteres essenciais de um grupo de fatos, separa-os das propriedades secundárias para generalizá-los. Por meio de abstrações científicas, o conhecimento passa da percepção de coisas isoladas à generalização de uma massa de fatos, formulando conceitos, categorias e leis que refletem os vínculos essenciais internos dos fenômenos. Só a generalização teórica permite ao pensamento humano pôr a descoberto a essência dos fenômenos, as leis do seu desenvolvimento. A impossibilidade de conhecer o geral por outro meio que não seja a abstração não significa que ele não seja real, que não exista. A lei da gravitação universal não pode ser fotografada, mas, nem por isso, podemos negar a sua realidade. A abstração científica materialista é diametralmente oposta à abstração idealista que separa o pensamento humano da realidade objetiva (KHLIABICH, 1967, p. 99).

Essa definição de abstração converge perfeitamente com a linha materialista dialética de nossa pesquisa, aliás, a escolha de Vygotsky, como nosso principal referencial teórico, também, converge para essa linha, pois ele foi um materialista dialético.

Dessa forma, a principal contribuição que podemos ter tirado de Vygotsky, além da formação de conceitos, foi a importância dada para a palavra, que se for apresentada pela primeira vez a um aluno, sem significado algum anterior, torna-se morta; vazia. Isso ocorre geralmente no ensino de física tradicional, onde sobra ao aluno alguma palavra desconhecida, como por exemplo, equação geral da onda, seguida de um símbolo matemático desconhecido, como um alfabeto grego, expresso em alguma equação. Nesse caso, tanto o conceito escrito pela palavra, o símbolo utilizado, como a equação, fazem parte de um mesmo conjunto vazio de significados para o aluno.

A fim de evitar esse vácuo de compreensão, nossa proposta de inserir a literatura no ensino de FMC converge para um ensino de física mais inteligível a um aluno de EM, pois lendo os alunos poderão se deparar com várias palavras desconhecidas, mas que não serão de todo vazias para eles, pois o enredo da história narrada traz seu significado. A literatura, portanto, permite que se entenda – mesmo como pseudoconceito ou como conceito potencial – uma palavra desconhecida que durante a leitura e desenvolvimento da narrativa traz algum significado, que tratado didaticamente se transforma em um conceito físico sobre FMC.

Assim, a leitura propicia que se generalize um conceito abstrato em outras situações futuras, inclusive na resolução matemática, pois o aluno já abstraiu o significado daquela palavra e poderá operá-la em diversos contextos. Entretanto, o mesmo ganho não é garantido se optarmos apenas pelo método de resolução mecânica

de exercícios. Muitas vezes, será verificado que o aluno consegue a nota necessária para ser aprovado, mas não compreende, de fato, o que ele fez. Se for questionado sobre alguma relação que necessite generalização conceitual do que acabou de fazer, muitas vezes, será averiguado que não conseguirá generalizar. Portanto, não abstraiu o que deveria. Isso se verifica na fala de Robilotta (1988), como a sensação de que os estudantes estudam, aprendem, mas parecem não saber Física:

Essa sensação aparece com frequência durante as nossas atividades relacionadas ao ensino de Física. É comum que mesmo alunos inteligentes e dedicados terminem os cursos com a impressão de que as longas horas de trabalho e todo o esforço empregado no estudo não são recompensados com alguma forma sólida de conhecimento. Parece que os cursos não fornecem aos estudantes a capacidade de andarem com as próprias pernas, de terem independência. Eles podem aprender a enfrentar os problemas e as situações que foram abordadas durante as aulas, mas ficam completamente sem iniciativa quando colocados frente a problemas novos. O conhecimento discutido no quadro negro não se ajusta ao mundo em que o estudante vive, ele não se enquadra na vida real. O ensino não parece levar os estudantes a serem proprietários do conhecimento. É como se, depois de muito estudo, esses alunos fossem não mais do que portadores de um saber cujos donos seriam os professores, os livros ou a escola (ROBILOTTA, 1998, p. 7).

A fim de evitar esse mar de falta de significação, essa sensação de vazio, criticada acima, vamos verificar as contribuições que um ensino de física articulado com a literatura, apoiado nas discussões precedentes, pode oferecer.

CAPÍTULO IV

Os pontos discutidos nos capítulos anteriores tiveram como objetivo preparar-nos para apresentar e analisar a forma como inserimos a literatura, como ferramenta didática, no ensino de FMC, trabalhando com os alunos a criação de conceitos físicos a respeito de elementos de MQ, através da criação de pseudoconceitos sobre os conceitos de FMC e MQ, presentes no livro *Alice no País do Quantum*. Nossa ideia central é demonstrar que os tais pseudoconceitos criados através da leitura, pelos alunos de EM, foram articulados didaticamente de forma a permitir a abstração científica (KHLIABICH, 1967). Buscamos até o presente, também, mostrar que essa linha de pesquisa é inovadora, uma vez que tanto o ensino de FMC, quanto a articulação entre física e literatura não estão presentes, de fato, nas salas de aula de física do EM; ao menos quando comparada com a Mecânica Clássica.

Os estudos sobre a inserção de literatura, divulgação científica, leitura de textos, analogias, metáforas, história e filosofia no ensino de física, constituem um campo de reflexões amplo, com consenso entre os autores a respeito dos benefícios que podem trazer ao ensino de física. Mas, deixam de lado a consideração que se faz necessária a respeito da abstração que essas inserções podem criar. Ou seja, não tratam o papel do desenvolvimento e dos processos mentais que tais recursos criam no aprendizado dos alunos, nem como se transformam em conceitos físicos adequados, para poder comparar a metodologia com o tradicional já existente.

Essa lacuna constitui um grande problema, uma vez que não temos parâmetros para conduzir nosso estudo, a fim de verificarmos como os alunos transformam os conceitos criados pelas leituras em conceitos científicos. Nesse contexto, o aporte teórico do interacionismo de Vygotsky foi preponderante por permitir averiguar como

se estabelecem os conceitos, por quais caminhos passam antes de estarem totalmente formados, além de nos guiar quanto à importância da abstração na formação de conceitos físicos genuínos. Além disso, Vygotsky em *Pensamento e Linguagem*, ressalta a importância da palavra na formação de novos conceitos, afirmando ser o significado de uma palavra um amálgama tão profundo que não se poderia distingui-la como pertencente ou ao pensamento ou à linguagem. O autor, contudo, estabelece claramente que:

Uma palavra sem significado é um som vazio; portanto, o significado é um critério da palavra e um seu componente indispensável. Pareceria, portanto que poderia ser encarado como um fenômeno linguístico. Mas do ponto de vista da psicologia, **o significado de cada palavra é uma generalização, um conceito. E, como as generalizações e os conceitos são inegavelmente atos de pensamento, podemos encarar o significado como um fenômeno do pensar** (VYGOTSKY, 2008, p. 151, grifo meu).

Essa distinção da palavra não em seu aspecto linguístico, mas tratada como um fenômeno do pensar serve muito bem aos propósitos que desejamos traçar em nossa pesquisa. Os alunos ao entenderem o significado de uma palavra, nesse contexto, criam generalizações, que usarão em outros momentos oportunos. Ou seja, aprendem um conceito por ter aprendido palavras novas e compreendido seu significado. É certo que muitas palavras, pertencentes ao escopo de conceitos da FMC, são estranhas aos alunos de EM. A leitura, portanto, torna-se uma ponte que fornece subsídios para que se apropriem dos significados dessas palavras, ou seja, permite ao aluno pensar, abstrair e criar os conceitos necessários à compreensão dos fenômenos físicos estudados.

Um segundo problema averiguado em nossa pesquisa, foi a forma como poderíamos inserir uma abordagem metodológica de ensino de física, por meio da literatura, dentro de um sistema de ensino fechado, como o que encontramos geralmente nas escolas, que se configura, em sua maioria, por um mercado de vestibular. Nesse

caso, a ênfase não está nos aspectos culturais que a disciplina possa proporcionar, mas, apenas, àqueles voltados à resolução de problemas de vestibular, constituindo-se em um ensino mecânico de repetição.

Nessa perspectiva, uma proposta que levasse em consideração a forma de pensar dos alunos, seu mundo, suas curiosidades, e que permitisse a esses alunos serem protagonistas do seu aprendizado foi possível mediante a abordagem de uma linha dialética de pesquisa, que proporcionou adentrar mais a fundo em sua cultura, seu modo de pensar e agir, possibilitando inserir intervenções em seu aprendizado.

Nesse contexto geral, acreditamos ter estabelecido até o momento algumas relações principais entre o ensino de física pela literatura, por meio da palavra, bem como as relações entre a palavra e a formação de conceitos físicos, assim como entre a pesquisa qualitativa dialética e o materialismo dialético de Vygotsky em seu contexto interacionista, além das relações entre a pesquisa qualitativa e a cultura dos alunos pela pseudoconcreticidade.

Em relação à participação dos alunos, a fim de preservar a sua identidade, não serão utilizados nomes, referenciaremos apenas os alunos de acordo com a série a que pertencem, ou seja, 3ºA ou 3ºB e, pelos seus números conforme constavam na lista de presença de cada turma.

Os dados coletados foram condensados por meio de questionário aberto (anexo III), onde os alunos responderam (anexo IV) um total de dez questões a respeito da importância de seu aprendizado em física articulado com a literatura e seus recursos.

Para análise e interpretação dos dados, valemo-nos do referencial teórico-metodológico oferecido por Vygotsky (2008), além da própria pesquisa qualitativa oferecida por Lüdke e André (1986) e Triviños (1987), a fim de melhor interpretarmos a

formação dos conceitos físicos por meio da literatura e importância da palavra, considerando também as ideias de Raymond Duval (2005), a respeito dos registros de representações semióticas e funcionamento cognitivo.

Embora os estudos de Duval (2005) sejam voltados à aprendizagem em matemática, é possível realizar uma transposição de elementos chaves em sua teoria que possibilitem uma interpretação razoável sobre a abstração de conceitos físicos. Conforme esse autor, a passagem da língua natural para a linguagem matemática caracteriza uma atividade denominada de *conversão*, a partir da qual é possível analisar os registros produzidos pelos alunos, de forma a mostrar as principais dificuldades encontradas por eles na passagem da língua natural, em nosso caso específico, através da leitura e literatura, para a linguagem física, isto é, a compreensão dos conceitos físicos pretendidos.

A importância das representações semióticas se estabelece no fato de que um mesmo objeto físico possa ser interpretado por vários outros sistemas semióticos. Para Duval (1993, p. 39 apud DAMM, 1999, p.143), as representações semióticas “*são produções constituídas pelo emprego de signos pertencentes a um sistema de representação os quais têm suas dificuldades próprias de significado e de funcionamento*”. Na física, em particular, a linguagem científica torna-se para o aluno o obstáculo quanto ao entendimento e significado sobre seus signos. De acordo com Duval (1993), essas representações semióticas, que são externas, desenvolvem a comunicação e a cognição, sendo por meio dessas representações semióticas que o aluno exterioriza, comunica e objetiva seu pensamento sobre um ente mais abstrato, o que leva a uma compreensão primeira sobre o objeto em estudo.

Conforme Duval (2005, p.21), “*como podemos não confundir um objeto e sua representação se não temos acesso a esse objeto a não ser por meio de sua representação?*” A abordagem cognitiva proposta por Duval (2005) que nos interessa, consiste, portanto, em realizar as conversões, que são transformações de representações semióticas, da leitura para os conceitos físicos mais abstratos, levando os alunos à compreensão destes.

Assim, a *conversão* proposta por esse autor se resume para nós no ato de ler, no papel mesmo da palavra, enquanto signo que leva a um pseudoconceito, um entendimento primeiro, que com o desenvolvimento da leitura ganha significado, sendo passível de generalização, em outros contextos literários, presente na obra estudada, para em seguida ser verificada a abstração literária se transformar em abstração física a respeito dos conteúdos abordados. Portanto, a conversão proposta por Duval (2005) já se encontra “absorvida” na teoria interacionista de Vygotsky (2008), na importância da palavra, do pensamento e da linguagem, presentes na língua materna pela literatura, como representações semióticas naturais e alternativas aos símbolos, signos e significados próprios da linguagem científica, a qual é desconhecida pelos jovens.

4.1 A INTERAÇÃO ENTRE OS ALUNOS E A ESCOLA

Os alunos que participaram da pesquisa foram do 3º ano A e 3º ano B, do Ensino Médio de uma escola da rede privada de ensino, com denominação católica, da zona sul da cidade de São Paulo. O total compreende 46 alunos, alguns com problemas cognitivos declarados e acompanhamento psicológico. A média de idade é de 17 anos, com classificação econômica nas classes média e média baixa¹⁸.

¹⁸ A classificação social, conforme dados do IBGE 2012 por renda, estipula como pertencentes à classe C aqueles com renda familiar de 4 a 10 salários mínimos e de classe B de 10 a 20 salários mínimos. Nossos alunos se restringem principalmente à classe C.

A maioria tem sido aluno desta instituição desde o início de seus estudos. De modo geral, e segundo a percepção dos professores dessa escola, os alunos se mostram muito apáticos quanto ao ensino que tiveram ao longo de seus anos de estudo. Ao que parece, não revelam qualquer interesse maior pelos conteúdos apresentados em todas as disciplinas, mesmo estando às portas de prestarem os exames vestibulares.

Entram na escola antes das 07:00 h e iniciam seus estudos a partir das 07:10 h, com aulas de 50 min, seis aulas por manhã e um intervalo de 20 min, além de duas tardes de aulas, com início às 13:50 h e término às 18:20 h, que completam a grade horária das disciplinas obrigatórias ao seu nível de ensino. Estas aulas da tarde são motivo de queixas constantes por parte desses alunos, que alegam não quererem estudar à tarde na escola, para poderem ter mais tempo de estudar em casa.

Nas primeiras aulas, de qualquer disciplina, há constantes faltas. Uma vez que os alunos podem chegar na segunda aula, muitos aproveitam essa oportunidade. No entanto, muitos daqueles que chegam frequentemente no horário da primeira aula, parecem não prestar atenção às aulas, pois ficam com a cabeça baixa sobre a mesa, dormindo.

O uso de celulares é constante, apesar de uma placa colada em todas as salas de aula com os dizeres em vermelho “LEI nº 12730”, alertando para a proibição¹⁹ do uso de celulares em sala de aula. Usam-no indiscriminadamente e a qualquer momento, inclusive e, principalmente, durante as aulas, tanto para ouvir músicas por meio de fones de ouvido, quanto como meios de comunicação virtual, pois os alunos vivem o

¹⁹ A lei que proíbe o uso de celulares em sala de aula apresenta em seu artigo 1º os dizeres: “Ficam os alunos proibidos de utilizar telefone celular nos estabelecimentos de ensino do Estado, durante o horário das aulas”. Salientamos que a lei, em si, não coíbe o uso dos celulares em sala de aula, faz-se necessário um trabalho pedagógico de conscientização do uso desses aparelhos, o qual não se verifica na maioria das escolas.

período de aulas digitando e enviando mensagens, principalmente, por meio do MSN²⁰, o que causa constantes interrupções nas aulas devido às solicitações dos professores para que desliguem seus aparelhos de celular. A escola não toma qualquer medida pedagógica a respeito, limitando-se à colagem da lei nas salas e solicitando aos professores para que não permitam o uso de celulares durante as aulas. Quanto aos pais, durante as reuniões, são alertados quanto ao prejuízo da aprendizagem de seus filhos pelo uso contínuo de celulares em sala de aula.

A partir das segundas aulas das manhãs, boa parte dos alunos começa a conversar entre si, a respeito dos mais variados assuntos, sobre o que viram na televisão, sobre o último jogo de futebol, ou a respeito de acontecimentos com colegas em comum fora da escola, enfim, tudo o que não dizia respeito a qualquer disciplina ou qualquer conteúdo. As conversas desse tipo se intensificam nas segundas feiras, quando se tem muito mais a comentar sobre o que fizeram no final de semana. Cabe ao professor pedir para que não conversem durante as aulas, gerando conflitos e um considerável desgaste, uma vez que os professores têm que destacar constantemente para os alunos sobre a importância de sua educação escolar. A escola, por sua vez, mantém-se omissa quanto a qualquer atitude necessária à tomada de consciência e valorização do espaço da sala de aula para fins de aprendizado. Após o intervalo e após o almoço, durante as aulas da tarde, as conversas paralelas entre os alunos é mais intensa.

Assim, a interação desses alunos com o ambiente escolar é estabelecida mediante poucas regras, que consistem em usar uniforme, chegar no horário e não namorar nos recintos do colégio. Contudo, a escola disponibilizava aos alunos espaços para leitura na biblioteca, laboratórios de ciências, laboratório de informática, quadra

²⁰ Na época em que essa pesquisa foi realizada os alunos ainda utilizavam o MSN (Microsoft Service Network) que foi um programa de mensagens instantâneas, criado pela Microsoft Corporation. Atualmente há outros aplicativos disponíveis.

poliesportiva coberta e descoberta, além de vários cursos extracurriculares como natação, robótica, dança e artes marciais. Mas, parece que poucos alunos usam o ambiente escolar com os propósitos de aprendizado; a biblioteca, por exemplo, raramente é visitada pelos alunos do EM. Aparentemente parece que vão à escola para socializar com os colegas, não para estudar, tanto que é comum ver muitos deles fora do horário de aula perambulando pelo pátio do colégio apenas conversando com outros alunos ou sentados manipulando seus celulares e ouvindo músicas.

A média para aprovação nas disciplinas é de 7,0 pontos. Mas, apesar de parecer uma nota alta, a escola compõe a média de forma a dar mais valor a trabalhos e simulados; a prova escrita tem apenas o valor de 2,0 pontos na composição dessa média. Além disso, os alunos que não atingem a nota estipulada podem realizar uma prova de recuperação, sendo constituída por um trabalho, com valor de 6,0 pontos feito em casa mais uma prova no valor de 4,0 pontos. Nessa relação estipulada pela escola com seus alunos, parece haver a proliferação do sentimento de que não é necessário estudar, dedicar-se, ou prestar atenção às aulas, pois no final acabam sendo aprovados de qualquer forma. Os alunos, principalmente os do 3º EM, acabam cumprindo o “jogo” da escola, deixando de se esforçar pelo simples fato de que não é necessário, pois estarão aprovados.

Diante desse cenário, é possível nos perguntarmos se esses alunos não vivem em um mundo de alienação, de fetichização (KOSIK, 2011) regrado por futilidades que levam apenas à satisfação pessoal por meio da mídia, música e comentários sem qualquer respaldo intelectual. A escola para eles parece ser mero espaço burocrático, onde jogam o “jogo” da escola e passam nas disciplinas.

4.2 A RELAÇÃO DOS ALUNOS COM AS AULAS DE FÍSICA

Dada a descrição da realidade cultural vivida, entre os alunos e a escola a que pertencem, a relação que possuem com as aulas de física não é muito diferente. Não entendiam os conceitos e fenômenos físicos estudados até então como uma interpretação da natureza por meio de modelos que possibilitam a compreensão da natureza e explicam aspectos da sociedade em que viviam. De modo geral, sabem do papel da ciência e até apoiam o trabalho dos cientistas, principalmente no que diz respeito às novas tecnologias, que fazem parte de sua realidade. Contudo, seus interesses findavam por aí, não se veem optando por uma carreira científica, alegando ter muitos cálculos ou ser muito difícil, como apontado por Fourez (2003). Não nutrem qualquer anseio maior em entender a ciência, a forma como é construída, ou como estudá-la, não foram inseridos na linguagem científica em todos os anos escolares que tiveram até então.

A compreensão que relataram a respeito da física é repleta de confusões e de uma relação incompreendida entre a física e a matemática, por exemplo, não sabendo distingui-las e não compreendendo o papel da linguagem matemática na formulação das leis físicas. Parecem não perceber como é possível generalizar fenômenos físicos por meio dessas leis, sendo que, no fundo, acham que a física e a matemática são a mesma coisa, tal como descrito por Ricardo e Freire (2007). Segundo os alunos, suas principais dificuldades se localizam na resolução das “continhas”, como eles mesmos chamam as expressões físicas. Essa percepção, por si só, já constitui um obstáculo epistemológico e pedagógico difícil de superar, uma vez que muitos desses alunos sequer sabem realizar as quatro operações matemáticas elementares dentro do conjunto dos números reais.

A relação apresentada com as aulas de física se restringia ao papel burocrático de conseguir notas suficientes para serem aprovados. Apesar de terem quatro aulas de física por semana, que constitui o dobro de aulas fornecidas aos alunos de escolas públicas, por exemplo, não demonstravam interesses maiores pela física que os fizessem se dedicar ou se aprofundar nos saberes físicos apresentados para eles. Nutrem um sentimento de que não necessitam da física para nada, nem para entender o seu cotidiano. Quando interpelados acerca do celular que possuem, ou os recursos tecnológicos da sociedade, que são oriundos de pesquisas físicas, simplesmente respondem que não é necessário saber isso para usá-los. O aprendiz de feiticeiro não necessita mais do feiticeiro para realizar suas magias (HOBBSAWN, 1995), ou seja, não necessitam compreender a física, ou as ciências, no geral para utilizarem os produtos tecnológicos em seu dia a dia, pois vem prontos para uso, sem qualquer necessidade de entender os aspectos científicos envolvidos. Nesse aspecto, os alunos consideram que basta apenas apertar alguns botões, entendendo que caso se faça necessário algum aspecto técnico, esse seria de responsabilidade de técnicos que consertariam seus produtos, se isso não funciona, simplesmente comprem novos.

Diante dessas relações estabelecidas entre os alunos de 3º EM, com o ambiente escolar e as aulas de física, eu como professor de física recém-chegado à escola, pois tinha sido contratado no meio do ano para atuar com o EM nesse colégio, deparei-me com um desafio pela frente. Questionava-me como lecionar para essa turma o seu último semestre de aulas de física. No primeiro dia de aulas uma das primeiras coisas que me perguntaram foi se a prova tinha muita “continha” para resolver. Na tentativa de criar uma trilha que me guiasse aos objetivos de ensinar a física articulada com outras formas de saber, como a literatura, por exemplo, sugeri algumas reorientações metodológicas, de forma a tentar trabalhar a física sob um novo olhar. Como tinha que

cumprir dois bimestres, um sobre Eletricidade e Eletrodinâmica e outro sobre Física Moderna e revisões da Física Clássica, de acordo com o estabelecido pelo cronograma de conteúdos, antecipei o preparo dos alunos para que no quarto bimestre pudéssemos estudar a FMC através da literatura, por meio de leituras, como do livro *Alice no País do Quantum*.

Inicialmente, os alunos ficaram desconfiados dessa aproximação da física com outras formas culturais, aliás, não enxergavam a física como pertencente à cultura, sendo que para eles a cultura era sinônima de arte, dança, música, teatro, etc., mas, a física não aparecia ou não era interpretada como uma forma de criação, que possuísse, também, arte e beleza na construção de suas leis. A falta da compreensão de que a física possui também um contexto cultural foi denunciada por Zanetic (2005) ao afirmar que:

Quando se fala em cultura, raramente a física comparece na argumentação. Cultura é quase sempre evocação de obra literária, sinfonia ou pintura; cultura erudita, enfim. Tal cultura, internacional ou nacional, traz à mente um quadro de Picasso ou de Tarsila, uma sinfonia de Beethoven ou de Villa Lobos, um romance de Dostoiévski ou de Machado de Assis, enquanto que a cultura popular faz pensar em capoeira, num samba de Noel ou num tango de Gardel. Dificilmente, porém, cultura se liga ao teorema de Godel ou às equações de Maxwell (ZANETIC, 2005, p. 01)!

Isso me exigiu um trabalho inicial de convencimento²¹, apresentando a eles vários exemplos durante as aulas, demonstrando o papel do modelo na física, como a física era construída, mudando a história, a sociedade e a filosofia ao longo de sua jornada. Buscamos desconstruir a visão mítica do gênio que teve uma “visão” e passou a formular leis físicas sobre a natureza; alertando, também, sobre o papel social da

²¹ Antes de iniciar os estudos sobre FQ com esses alunos, no 3º bimestre tiveram conteúdos de eletricidade e eletromagnetismo. Sobre esses conteúdos relatei aspectos históricos, culturais e literários, como: o início dos estudos de eletricidade; a pilha de volta; o experimento com rã morta que mexeu as patas ao ser eletrizada, fazendo com que jovens buscassem tonificar seus músculos tomando choque; as motivações de Mary Shelley ao escrever Frankenstein; como Faraday permitiu uma nova revolução industrial ao descobrir que magnetismo gera eletricidade, a série francesa “*Voyage en électricité*” entre outros. Tais exemplos forneceram aos alunos o início de uma compreensão cultural da física, que facilitou os estudos sobre MQ por meio da literatura.

ciência e da responsabilidade dos cientistas. Ao final do terceiro bimestre esses alunos se mostraram mais receptivos com respeito à física, tendo compreendido um pouco mais sobre as relações entre física e cultura.

Tendo-me inserido em sua cultura, em seu contexto escolar como professor, foi mais fácil observar como agiam e como articulavam seu pensamento a respeito das aulas de física. Deixei-os, de início, cientes de que estava ali para ajudá-los e não prejudicá-los em relação ao seu aprendizado, o que me permitiu realizar um processo de intervenção que pudesse levar a uma compreensão da física como construção humana, e com aspectos culturais, sem, com isso, menosprezar o papel e a importância da matemática para construção dos saberes físicos, o que foi, aliás, esclarecido para esses alunos. A opção didática e a etnográfica da pesquisa e da minha prática como professor se mostraram fundamentais nesse processo de aproximação.

4.3 INÍCIO DOS ESTUDOS

Iniciado o quarto bimestre, tinha em mãos uma apostila da rede católica de ensino sobre Relatividade e Física Moderna para trabalhar os conteúdos com os alunos que, em geral, não apresentava nada de diferente em relação ao conteúdo e forma de apresentação de outras apostilas. Decidi usar apenas o primeiro capítulo sobre relatividade articulando-o com outras ferramentas, como vídeos e filmes de ficção, para, em seguida, abordar a FMC por meio da literatura.

Antes do início desse bimestre havia solicitado que os alunos comprassem o livro *Alice no País do Quantum*, para leitura, além de fornecer-lhes o link para download em PDF do livro, disponível no Modlle Stoa da USP. Alguns alunos compraram o livro, outros baixaram o PDF e leram pelo computador ou imprimiram.

Todos os alunos tiveram acesso ao material, e a leitura foi realizada pelos alunos, antecedendo as aulas.

Após o término da apresentação e estudo da teoria da relatividade, a qual fazia parte do programa de conteúdos do 4º bimestre dos alunos, distribui a cópia do capítulo XVIII da *Era dos Extremos* de Hobsbawn (1995), (anexo II) para leitura e discussão na aula seguinte que seria em uma segunda-feira.

Essa primeira aula teve como objetivo levantar algumas reflexões por parte dos alunos sobre os impactos do surgimento da nova física, no âmbito científico, filosófico, social e histórico, mostrando que o nascimento da Física Moderna abalou os alicerces da concepção de mundo newtoniano de até então. Tiveram acesso às discussões de vários físicos como Niels Bohr, Max Planck, Albert Einstein, Werner Karl Heisenberg e Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger, a respeito da aceitação da nova física, de suas incertezas e probabilidades, conforme ilustra a passagem a seguir:

Houve pioneiros da nova ciência que simplesmente acharam impossível aceitar o fim das velhas certezas, assim como seus fundadores, Max Planck e o próprio Albert Einstein, que manifestou desconfiança de leis puramente probabilísticas em vez da causalidade determinista, numa frase bastante conhecida: “Deus não joga dados”. Não tinha argumentos válidos, mas “uma voz íntima me diz que a mecânica quântica não é a verdade de fato” (citado em M. Jammer, 1966, p. 358). [...] O jogo era novo. As velhas regras não mais se aplicavam (HOBBSAWN, 1995, p. 519-520).

Essa leitura facilitou bastante a compreensão inicial da Física Moderna como construção de um novo conhecimento. O que colaborou também para desmistificar os saberes físicos como produto de gênios isolados, mostrando que o conhecimento só é alcançado por meio de muito esforço intelectual, não ocorrendo por acaso, do nada, como a *quasi-history* (WHITAKER, 1969) da maçã na cabeça de Newton, que o teria levado a “descobrir” a gravidade. De fato, uma aluna se demonstrou surpresa ao

descobrir que isso não era verdade, pois sempre ouvira falar dessa passagem e a tomava como verdadeira.

Como primeira aproximação da física com a literatura, os alunos demonstraram ter aceitado bem a leitura desse capítulo de Hobsbaw, tendo inclusive compreendido a importância da física em seu contexto histórico e filosófico. Para registrar as impressões acerca dessa abordagem pela leitura, a primeira questão proposta para os alunos (anexo III) foi:

A leitura introdutória do capítulo XVIII – Feiticeiros e Aprendizes, da Era dos Extremos, de Hobsbaw, foi pertinente para compreensão inicial, e entendimento da importância dos estudos sobre a Física Moderna?

As respostas apresentadas pelos alunos (anexo IV) demonstram ter havido uma boa compreensão, como ilustra o comentário²² do aluno 09:

“Através da explicação do contexto histórico da transição da física clássica para a física moderna foi possível obter um melhor entendimento de como surgiu a necessidade de estudar o mundo quântico. Com os estudos da física moderna a tecnologia pode ser aprimorada para atender às necessidades do ser humano, proporcionando o “bem estar”, como é dito no capítulo, basta que saibamos apertar alguns botões para executar uma ação, por exemplo, o leitor de código de barras que há nos supermercados, nele existe a ação dos fótons” (ALUNO 09).

Além da compreensão sobre o aspecto histórico, parece que entenderam também que a leitura fornece subsídios para melhor compreensão dos conceitos envolvidos. A resposta de uma aluna exemplifica essa percepção:

“Nos possibilitou aprofundar na história da Física Moderna, ou seja, aprendemos mais a teoria e sobre a utilidade da física em nosso cotidiano, o que acaba por facilitar o entendimento e até a resolução de contas” (ALUNA 36).

²² Os comentários dos alunos (anexo IV) foram transcritos literalmente, inclusive com erros ortográficos ou de concordância.

Era um dos objetivos, conforme foi discutido anteriormente, que a leitura trouxesse significado pela conversão semiótica entre a leitura e a expressão física. Decerto, houve respostas que refletiram outra dificuldade de aprendizado dos alunos, que reside na própria leitura da língua materna, principalmente para aqueles alunos que não criaram o hábito de ler em toda a sua vida escolar. Um dos alunos enfatizou que a leitura não foi agradável: “... *Teve fatos curiosos e interessantes ao longo da leitura, mas foi uma leitura maçante*” (ALUNO 06).

Pode ser que essa fala externe a falta de hábito em ler, ou a falta de “gosto”, prazer, pela leitura, ao expor seu sentimento de que achou a leitura “maçante”, no sentido de ser difícil de ler, ou, talvez, tenha achado a leitura muito densa. Entretanto, apoia a utilização do texto, mesmo com seu comentário, apontando que encontrou fatos curiosos e interessantes.

Após a leitura deste capítulo da *Era dos Extremos*, e sua respectiva discussão em sala, foi marcada a primeira aula sobre FMC com os alunos. Nessa altura, eles já haviam adquirido o livro *Alice no País do Quantum*, ou as cópias, e foi possível, primeiramente, explicar a estrutura do livro.

O livro foi apresentado alertando-se os alunos de que se tratava de uma analogia, uma representação possível de dar um entendimento primeiro sobre os conceitos físicos da quântica, mas não representava a realidade concreta da física quântica. As aventuras de *Alice* ao longo da narrativa foram expressas como a ficção que elas representam, mas que estabelecem relações com os conceitos físicos. Da mesma forma, já havia comentado com os alunos das relações matemáticas presentes na obra *Alice no País das Maravilhas*, escrita pelo matemático Charles Lutwidge Dodgson, mais conhecido pelo

seu pseudônimo Lewis Carroll, que em seu romance aproxima os leitores de conceitos matemáticos mais abstratos.

A proposta de formular proposições argumentativas favoráveis ao uso eficaz de romances matemáticos na construção do conhecimento já foi estudada por Teixeira e Mendes (2006). Na mesma direção, também havia comentado com os alunos sobre o romance *O Homem que Calculava*, de Malba Tahan, heterônimo do professor e matemático Júlio César de Mello e Souza. Com isso, procurei mostrar aos alunos que as relações entre conceitos mais abstratos, presentes tanto na física, quanto na matemática poderiam ser compreendidos, também, pela leitura.

À parte da ficção *Alice no País do Quantum*, que o romance apresenta, também expliquei aos alunos sobre as notas existentes ao longo da obra, cujo objetivo é apresentar o real significado de alguns temas importantes, conforme orienta Gilmore (1998, p.8), em seu prefácio: “*se quiser descobrir o real significado dessas aventuras, as notas estão convenientemente próximas*”. As notas estão dispostas ao longo do romance, e possuem o seguinte aspecto, como ilustrado abaixo:

No mesmo sentido, alertei os alunos para a existência de notas explicativas, mais longas, dispostas nos finais dos capítulos, que esclarecem alguns conceitos.

Assim orientados, poderiam ler os três capítulos iniciais sugeridos e observar as notas explicativas existentes ao longo da narrativa das aventuras de *Alice*, a fim de procurarem um significado maior sobre alguns conceitos iniciais.

Em seguida, lemos conjuntamente, em sala de aula, o prefácio de *Alice no País do Quantum*, o que foi muito importante por permitir verificar, de início, as dificuldades primeiras que os alunos apresentariam quanto ao significado de algumas palavras, como a própria Física Quântica (FQ), que muitos perguntaram a respeito do que se tratava. Tinham ouvido falar, em meios de comunicação, mas não conseguiam formar um conceito, um significado, do que essa palavra representava. Devolvi a pergunta, questionando-os acerca do que eles achavam que significava, mas não conseguiram responder. O termo em si para eles era uma palavra oca, vazia e sem sentido. Inicialmente expliquei a eles que ao longo de nossos estudos verificaríamos o que ela representava, informando, nesse momento, apenas, que a física quântica estuda o “mundo do muito pequeno”. Ou seja, sistemas físicos cuja dimensão é próximo ou abaixo da escala subatômica. Mesmo sem compreenderem muito bem o que isso significava, conseguiram ter uma pequena noção, que no decorrer das leituras tomou forma mais consistente.

Das três páginas do prefácio lidas com eles em sala, demonstraram um receio sobre o estudo da quântica, alegando que parecia muito difícil e complicada, principalmente quando leram a fala de Niels Bohr afirmando que: “*qualquer um que não tenha ficado aturdido ao pensar na teoria quântica não a compreendeu*” (GILMORE, 1998, p.8). Além disso, ainda mostraram muita insegurança quanto ao entendimento de analogias e sobre partículas, como o quark, o qual nunca ouviram falar.

Esses anseios nortearam a produção de minha primeira aula com eles. Tratei de levá-los à sala de vídeo e apresentei o filme *O discreto charme das Partículas Elementares*, de duração de 50 min, produzido pela TV Cultura e disponível no YouTube. Esse filme foi baseado no livro, de mesmo nome, da professora Dra. Maria Cristina Batoni Abdalla. Também sugeri que lessem o seu artigo: Sobre o Discreto Charme das Partículas Elementares, publicado em 2005 na revista física na escola.

As impressões sobre o filme e sobre a leitura agregaram bastante na compreensão dos alunos a respeito das partículas elementares, bem como sobre o acelerador de partículas que, vez ou outra, era lembrado na mídia, embora de forma descontextualizada e através de pequenas notas que não permitiam ao telespectador compreender o mínimo necessário sobre ele.

Nessa primeira investida os alunos já se apresentaram mais seguros em estudar a FQ por meio da literatura; tinham aprovado o filme e o artigo; gostaram dos desenhos representativos das partículas, tanto no filme, quanto no artigo e começaram a compreender o que eram as analogias, uma vez que os alertei que aquelas figurinhas coloridas, representavam os seis quarks, os seis léptons e os bósons mediadores, mas não passavam de representações. Com “rostinhos de monstros”, sendo que, na realidade, a sua forma concreta não é relevante, nem possível de ser conhecida.

Uma vez que tiveram uma boa introdução a respeito de partículas elementares, preparei a segunda aula de forma a melhorar a compreensão que tinham sobre modelos e analogias. Assim, apresentei o histórico dos modelos atômicos, a fim de proporcionar maior entendimento, tanto sobre a teoria quântica que tinha sido desenvolvida para explicar observações realizadas nos átomos, quanto sobre o papel de modelos e analogias, como representantes de conceitos físicos.

O uso da simulação *Modelos do Átomo De Hidrogênio* (figura 2), do aplicativo JAVA PHET COLORADO²³, sobre fenômenos quânticos, foi muito eficaz nesse sentido. A interação proporcionada pelas Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), comumente, mostram-se eficientes por prender a atenção dessa geração de jovens. Além disso, proporciona uma estrutura semiótica a mais para auxiliar na transformação, ou conversão, de pré-conceitos em conceitos físicos adequados.

Figura 2: Modelos atômicos de Dalton à Schrödinger.

Através desse aplicativo foi possível mostrar aos alunos modelos diferentes do átomo de hidrogênio dentro de um contexto histórico de construção do conhecimento físico. Permitiu explicar as previsões experimentais de cada modelo; trabalhar na ideia de que as pessoas acreditavam em cada um desses modelos e por que cada modelo histórico era inadequado. Discutimos como se dá a relação entre a interpretação física

²³ Os aplicativos Java são gratuitos e distribuídos pela Universidade de Colorado, constituem grande ferramenta educacional por proporcionar aos alunos uma interação maior com os fenômenos e conceitos estudados através das TIC. Além disso, ainda acompanham um guia com dicas para o professor, além de ideias de aula, exemplos, prontos pela equipe PHET. O aplicativo citado está disponível no endereço http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/hydrogen-atom.

das órbitas e o diagrama de nível de energia de um elétron, além de inserir o aluno na construção de modelos.

Ao final da apresentação dessa aula, os alunos indicaram ter compreendido os modelos como analogias, que representam uma realidade esboçada, mas não significam a realidade de fato. Sendo constructos pelos quais o cientista elabora suas leis para serem passíveis de generalizações.

É importante salientar que a ideia de modelo que os alunos possuíam, anterior a essa aula relacionava-se à modelo de moda, com suas garotas propaganda. Nessa pseudoconcreticidade viva de fetichizações sociais e culturais que estavam inseridos, a palavra modelo possuía o significado de mulher ou vestimenta. Lembrei-os de que um modelo de moda representa uma indústria de moda, não uma mulher real, até porque não vemos mulheres como essas em nosso dia a dia, constituindo-se como constructos que tem o papel de representar as roupas que os estilistas produzem.

Da mesma forma, um modelo de um tanque de guerra em miniatura indica apenas uma representação, não um tanque de verdade. Essa explicação foi suficiente para que compreendessem um modelo como uma analogia, criando novo significado para a palavra “*modelo*” que tinham anteriormente, contribuindo para que pudessem abstrair os modelos científicos como tais, a partir de então.

Tendo estabelecido esses cuidados iniciais com os alunos, que se resumiram em indicar uma percepção melhor do que representam as analogias, ou modelos, e as estruturas semióticas abordadas até então, como as partículas elementares, tornou-se possível iniciarmos a leitura sobre as aventuras de *Alice no País do Quantum*, buscando conhecer mais sobre esse estranho mundo da física quântica.

4.4 PELA TOCA DO COELHO OU PELO TUBO DE RAIOS CATÓDICOS?

Indicando o quanto se quer aprender ou se aprofundar em determinado assunto, iniciei a leitura dos três primeiros capítulos de *Alice no País do Quantum*, perguntando aos alunos o quanto eles queriam entrar na toca do coelho. Uma alusão à *Alice no País das Maravilhas*, que entra na toca do coelho porque era curiosa e procurava descobrir mais a respeito das coisas que vinha observando. Da mesma forma, o primeiro capítulo de nosso livro fez a alusão a uma garota que entra, não na toca de um coelho, mas no tubo de raios catódicos de sua televisão, e, ao invés de perseguir um coelho, persegue um elétron. A essa altura já estavam envolvidos no tema de estudo, pelo pouco anteriormente visto, e responderam positivamente ao seu ingresso no mundo da física quântica. A tarefa inicial de convencimento, ou adesão ao projeto de ensino havia se cumprido.

Da leitura do capítulo 1, os alunos mostraram dúvidas quanto ao significado de algumas palavras e fatos presentes na narrativa. A personagem Alice nesse primeiro capítulo adentra o mundo quântico através da tela de seu televisor, encontrando uma entidade disforme com quem começa a conversar. Essa entidade se apresenta como um elétron-spin para cima. A nota explicativa (GILMORE, 1998, p. 13) explica que dependendo da sua direção de rotação, os elétrons são conhecidos como *spin-para cima* ou *spin-para baixo*. A ilustração (Ibidem, p. 17) mostra os elétrons com formas pontudas para cima e para baixo, como demonstra a figura 3 abaixo. Muitos alunos perguntaram o que eram essas pontas. Quando discuti pela nota explicativa o sentido de rotação e mostrei que essa forma pontuda para cima ou para baixo da figura representava o spin, os alunos mostraram ter entendido a analogia.

Figura 3: Analogia que mostra os elétrons com espadas ou pontas para cima e para baixo, indicando o sentido de rotação dos mesmos, ou seja, seu spin.

Outra dúvida frequente foi em relação ao motivo pelo qual Alice não conseguia ver com clareza os elétrons e porque dois elétrons com mesmo spin não podiam estar juntos. Isso que possibilitou explicar a respeito do princípio da incerteza de Heisenberg, mencionado na leitura anterior de Hobsbawn (1995), que impõe restrições quanto à precisão com que se podem efetuar medições simultâneas de uma classe de pares de observáveis em nível subatômico, como por exemplo, a posição e a velocidade. Assim, *Alice* não podia ver com clareza os elétrons. Se o elétron tentasse diminuir sua velocidade expandia-se e ficava mais disforme, o que se verifica nessa passagem do livro:

"Sou bastante gentil", disse o elétron, "mas receio que não haja espaço bastante. Mas vou tentar, de qualquer forma." Assim dizendo, ele começou a diminuir a sua taxa de agitação. Mas quanto mais devagar se movia, mais se expandia para os lados e mais difuso ia ficando. Naquele momento, apesar de não se mover rapidamente, ele estava tão indefinido e tão fora de foco que Alice não conseguia vê-lo com mais clareza do que antes (GILMORE, 1995, p. 12-13).

Outro questionamento se deu sobre qual elétron falava com Alice, uma vez que durante sua incursão no mundo quântico dava a impressão de outro elétron estar conversando com ela, o que me possibilitou comentar sobre o Princípio de Exclusão de

Pauli, que determina a impossibilidade de que haja mais do que um elétron no mesmo estado quântico, com o mesmo spin, além do fato dos elétrons serem absolutamente idênticos uns aos outros. Os alunos justificaram sua compreensão dessa explicação me recordando da passagem do livro (p. 15) em que o elétron *spin-para cima* não entra em um vagão de trem já ocupado por outro elétron, também, *spin-para cima*.

Um fato da narrativa em particular chamou a atenção da maioria dos alunos: quando uma partícula tentava *tunelar* uma porta (GILMORE, 1995). A nota constante no livro oferece a seguinte explicação:

A teoria quântica descreve o comportamento de partículas em termos de distribuições de probabilidade, e a observação real de partículas individuais ocorre aleatoriamente dentro dessas distribuições. As probabilidades podem incluir processos classicamente proibidos, tais como a penetração de partículas através de uma estreita barreira de energia (GILMORE, 1995, p. 19).

Tal explicação não foi suficiente para que os alunos entendessem o processo quântico descrito pela analogia e pela leitura. Contudo, a curiosidade deles permitiu que recorrêssemos ao aplicativo Java sobre tunelamento quântico, conforme descrito pela figura 4. Assim, foi possível trabalhar os seguintes tópicos sobre esse processo: visualização de funções de onda para potenciais de barreira, com degrau/poço e constante; verificação da forma de função do elétron para ondas planas ou em pacotes; interpretação e distinção da parte real, imaginária e o valor absoluto da função de onda, além da densidade de probabilidade; reconhecer como a probabilidade de reflexão e transmissão de uma onda se relaciona com a energia da onda, em relação à energia com degrau ou com barreira, ou em relação à largura da barreira; verificar que uma onda plana tem um valor único de energia e que um pacote de ondas tem um alcance de uma gama de energias e; explicar como interferem as ondas que chegam e refletem.

Figura 4: tunelamento quântico. Disponível em:
http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/quantum-tunneling

O uso desse recurso possibilitou, inclusive, justificar a analogia seguinte, quando Alice se depara com homens jogando tijolos a esmo e, instantes depois, surgem paredes formando cômodos (GILMORE, 1995, p.20), o que se justifica pela maior distribuição de probabilidades naquele local.

A leitura do capítulo posterior, denominado *Banco de Heisenberg*, foi realizada sem muitos problemas. As partículas citadas já haviam sido discutidas na leitura anterior em Abdalla (2005), além da apresentação do filme *O Discreto Charme das Partículas Elementares*. As dúvidas se limitaram, portanto, sobre a constante de Planck; sobre a constante de Planck reduzida e sobre o episódio final, no qual Alice passa por várias portas ao mesmo tempo, ou seja, encontra-se em superposição de estados.

Os alunos se lembraram de Max Planck da leitura de Hobsbawn (1995), anexo II. Sua constante foi apresentada como necessária para a descrição do tamanho do quanta; o pacote de energia emitido pelos fótons. O valor, aproximado, da constante de

Planck $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s. Já a constante reduzida ($\hbar$) foi explicada como a constante de Planck dividida por 2π . E, a expressão $E = h \cdot \nu$, foi trabalhada para demonstrar alguns cálculos de energia de fótons. Muitos alunos confundiram o símbolo ν com velocidade. O que indica que o signo desconhecido gerou confusão, sendo necessário, primeiro, dar sentido a este. Para dirimir essa confusão, simplesmente troquei o caractere grego ν , pela letra f de frequência, o que resolveu o problema de significado.

Para dirimir a questão descrita no final do segundo capítulo, relembrei as aulas de ondulatória, onde tiveram o conteúdo sobre interferências construtivas e destrutivas. Quando duas ondas com mesma ou diferentes amplitudes se encontram na mesma fase, ocorre um aumento resultante nessa amplitude que se resume a soma das amplitudes, a esse processo denominamos interferência construtiva. Contudo, quando as fases são opostas, ocorre uma subtração das amplitudes, caso sejam iguais, resulta na chamada interferência destrutiva. As figuras 5 e 6 ilustram a explicação fornecida:

Figura 5: Interferência Construtiva

Figura 6: Interferência destrutiva

A narrativa final do capítulo 2 descreve *Alice* abrindo diversas portas ao mesmo tempo, observando diversas possibilidades, uma delas é a porta que ela desejava chegar: *O Instituto de Mecânica*. Quando *Alice* observa a porta desejada, representa a medição de um sistema observável (a porta), sendo a probabilidade de colapsar para um estado particular (Instituto de Mecânica), diretamente proporcional à raiz quadrada do módulo da amplitude associada a esse estado.

O capítulo três trata do Instituto de Mecânica, onde *Alice* se encontra com dois personagens, o *Mecânico Clássico* e o *Mecânico Quântico*, que representam, respectivamente, a visão da física clássica e da física moderna. Como uma alusão aos clássicos personagens Simplicio e Salviati, de Galileu Galilei, os dois *mecânicos* apresentam suas explicações a respeito dos fenômenos naturais, enquanto *Alice* parece representar o personagem *Sagredo*, que ouve as duas versões e tira suas conclusões.

Nessa parte da narrativa, são descritos importantes conceitos físicos como a dualidade onda-partícula, sendo por isso considerado o mais importante dos três, por apresentar a essência da física quântica. De acordo com Pessoa Junior (2003), a física quântica apresenta diversas interpretações propostas na literatura científica, sendo que a essência da física quântica, de acordo com esse autor, é a dualidade onda-partícula, conforme descreve:

Em poucas palavras, o que caracteriza a Teoria Quântica de maneira essencial é que ela é a teoria que **atribui, para qualquer partícula individual, aspectos ondulatórios, e para qualquer forma de radiação, aspectos corpusculares**. Esta é uma versão “geral” da dualidade onda-partícula (PESSOA JUNIOR, 2003, p. 1, grifo do autor).

A estranheza da Física Quântica pode ser inicialmente apresentada por essa descrição proposta por Pessoa Junior (2003), uma vez que para a física clássica uma partícula tem velocidade e posição bem definidas, além de descrever trajetórias bem definidas também. Já uma onda tem a característica de espalhar a sua energia, apresentando fenômenos peculiares, como o caso da interferência, que para a física clássica só ocorre com as ondas. Ao lerem o capítulo 3, nossos alunos constataram que na física quântica há características ondulatórias também nas partículas. Essa, talvez, seja a grande lição da MQ.

Em geral, após a leitura desse capítulo, os alunos se inquietaram a respeito do motivo da difração de ondas se apresentar de uma forma na explicação do Mecânico Clássico e de outra na explicação do Mecânico Quântico. Também questionaram a razão pela qual Alice, ao olhar por onde os elétrons passavam, percebia que eles deixavam de apresentar interferência. Os alunos também estranharam o conceito de superposição exemplificado pelo gato de Schrödinger, proposto ao final do capítulo.

Analisando os comentários dos alunos foi percebido que não ocorreu, na realidade, falta de entendimento pela leitura efetuada, entenderam bem a narrativa proposta nesse terceiro capítulo, além das notas explicativas, constantes ao longo da narração. Eles se mostravam desconfortáveis por não entenderem o porquê desses eventos ocorrerem assim. Ou seja, ao final da leitura, os alunos estavam perplexos com a estranheza dos fenômenos quânticos, o que indica certo entendimento inicial dos conceitos oferecidos pela FMC e pela MQ.

Foram retomados alguns conceitos ondulatórios clássicos com eles, como a difração de ondas na água, formando padrão de interferência, bem como a demonstração do experimento da dupla fenda de Young. Em seguida, achei interessante apresentar a dualidade da luz, para, em seguida, demonstrar a dualidade da matéria proposta por De Broglie. Uma representação interessante é dada por um personagem fictício chamado Dr. Quantum, disponível no Youtube, como mostra a figura 7. Nesse vídeo é demonstrado o padrão de interferência com partículas, além do papel do observador que faz esse padrão desaparecer, isto é, o ato de observar faz com que os elétrons voltem a apresentar seu caráter corpuscular incidindo no anteparo apenas em duas linhas.

Figura 7: Experimento da dupla fenda para o elétron. Representação proposta em vídeo do Youtube.
Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=lytd7B0WRM8>.

Esse vídeo apenas reapresentou o problema anteriormente descrito na leitura do terceiro capítulo de *Alice no País do Quantum*, não respondendo em sua totalidade, ao questionamento maior dos alunos, ou seja, porque isso ocorre; o que me permitiu apresentar a equação de onda de De Broglie:

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

Onde h significa a constante de Planck e ρ a quantidade de movimento (massa vezes velocidade: $m.v$). Com isso foi possível introduzir, também, aspectos históricos sobre Louis Victor De Broglie que baseado, no princípio da simetria, pensou que, se a luz era dual, então a matéria, também, deveria apresentar características ondulatórias. Esclareci aos alunos que a equação de De Broglie pode ser aplicada a toda matéria. Os corpos macroscópicos, como nós mesmos, também apresentam uma onda associada, mas, dado que a massa de um corpo macroscópico, como uma pessoa, é muito grande, o

comprimento de onda resultante é tão pequeno que se torna desprezível, não sendo possível perceber as suas características ondulatórias.

Para comprovar essa situação solicitei aos alunos que resolvessem o seguinte problema: considerando um atleta profissional que corra 10 m/s e tenha 80 kg, e um elétron de massa $9,1093897 \times 10^{-31}$ kg que apresente a velocidade de $3,0 \cdot 10^8$ m/s, verifique o comprimento de onda de De Broglie para ambos os casos.

Os alunos apresentaram $\lambda = 8,28 \cdot 10^{-37}$ m para o comprimento de onda do atleta e $\lambda = 2,42 \cdot 10^{-12}$ m, ou 2,42 pm (picômetro) para a partícula. Com essa resposta puderam verificar que o comprimento de onda da matéria é inversamente proporcional ao produto da massa pela velocidade do corpo. Como um corpo macroscópico apresenta massa grande e velocidade baixa não terá onda associada considerável. Contudo, uma partícula com massa pequeníssima e velocidade alta resulta em uma onda não desprezível, como no exemplo dado, para um elétron a onda equivalente na ordem do picômetro é uma onda considerável para efeitos quânticos.

Além do cálculo realizado, é importante salientar que os alunos tiveram interesse pelo mesmo após as leituras efetuadas. Certamente a equação de onda de De Broglie, por si mesma, não teria gerado essa curiosidade, sendo a leitura a motivadora pela verificação numérica, isto é, incentivou os alunos e deu sentido à equação utilizada, sendo muito mais compreendida dentro do contexto abordado, se for comparado, apenas, ao cálculo pelo cálculo. Assim, foi possível, também, aproximar os alunos do pensamento matemático mais abstrato, dando sentido a esse e ligando-o, tanto aos eventos descritos na narração, quanto aos fatos mais concretos e próprios da teoria quântica, permitindo um ganho conceitual muito maior pela interação, como proposto por Vygotsky (2008), entre ambos os métodos.

Quanto à superposição de estados quânticos, apresentada por meio do experimento mental do gato de Schrödinger, os alunos se mostraram desorientados por eu ter comentado que aquele experimento foi proposto realmente pelo físico, cujo nome já haviam lido a respeito no texto proposto do capítulo XVIII da Era dos Extremos de Hobsbawn (1995). Mas, destaquei que se tratava de um “*gedankenexperiment*”²⁴, cujo objetivo era demonstrar que uma partícula pode estar em superposição de estados quânticos, em vários lugares ao mesmo tempo, no caso do gato, vivo e morto ao mesmo tempo, uma vez que ninguém pode observar seu real estado dentro da caixa fechada. Quando um observador realiza uma observação, há o colapso da função de onda, e dada essa interferência, o ato de observar, verifica-se a partícula, ou como no caso do “*gedanken*”, constata-se se o gato está vivo ou morto, mas até lá, ele se encontra em superposição - vivo e morto.

Depois de termos discutido essa questão, os alunos comentaram sobre a analogia da superposição presente, também, no final do capítulo 2 (anexo I), onde Alice se encontra adentrando várias portas ao mesmo tempo procurando o Instituto de Mecânica. Comentaram ter compreendido o colapso de função de onda, lembrando que quando Alice chega à porta que queria, as outras Alices descritas, estando em outras portas, desaparecem. Relataram também o exemplo fornecido pelo vídeo do youtube (figura 7), onde o dispositivo observador gera o colapso da função de onda dos elétrons emitidos, fazendo com que desapareça o padrão de interferência e o anteparo registre a colisão das partículas em apenas duas linhas dadas pela dupla fenda.

Essa discussão nos levou a comentar sobre os experimentos de pensamento, utilizados na física ao longo de sua construção. Seu emprego na história da ciência é

²⁴ Termo normalmente creditado a Ernest Mach. A expressão, no entanto, foi popularizada com os Gedankenexperiment de Albert Einstein, utilizados para explorar algumas consequências da sua Teoria da Relatividade, embora sejam constatados desde a Grécia antiga.

farto, sendo utilizado dos pré-socráticos à Física Moderna. Tomas Kuhn (1977) ressalta sua capacidade de contribuição para a pesquisa:

Nem é acidental o fato de que em ambos os períodos a chamada experiência de pensamento ter desempenhado um papel tão crítico no progresso da pesquisa. Como mostrei em outros lugares, a experiência de pensamento analítica que é tão importante nos escritos de Galileu, Einstein, Bohr e outros é perfeitamente calculada para expor o antigo paradigma ao conhecimento existente, de tal forma que a raiz da crise seja isolada com uma clareza impossível de obter-se no laboratório (KUHN, 1977, p.120).

Decerto, os experimentos de pensamento desempenharam um importante papel na história do pensamento científico, possibilitando abstrair conceitos, eventos e fenômenos que, muitas vezes, na prática, seriam muito onerosos, ou difíceis de reproduzir, ou até mesmo impossíveis de se verificarem experimentalmente, como o caso de Einstein (1999) ao pensar em viajar cavalgando em um raio de luz.

Após nossa discussão sobre o experimento do gato de Schrödinger, alguns alunos me relataram ter assistido o filme *Quem Somos Nós*, onde há a passagem de um menino batendo uma bola de basquete em uma quadra (ver figura 8) estando em várias posições da quadra ao mesmo tempo, quando uma mulher, a protagonista do filme, vira-se e olha para o menino, ou seja, observa sua posição batendo a bola no chão, acaba por gerar o colapso da função de onda. Questionaram-me se essa passagem poderia ser uma analogia, também, para se entender a superposição e o colapso de onda. Dado o interesse desses alunos decidi que todos deveriam assistir esse trecho do filme, o que gerou uma grande satisfação para os alunos que o sugeriram, pois se sentiam protagonistas de seu aprendizado. Além de trechos do filme *Quem Somos Nós*, os alunos também assistiram a trechos disponíveis no Youtube da série *The Big Bang Theory*, a respeito do paradoxo do gato de Schrödinger e trechos do filme *Um Homem Sério*.

Figura 8: Cenas do filme Quem Somos Nós, mostrando analogias sobre superposição de estados quânticos e colapso de onda. Apresenta uma visão idealista da Teoria Quântica. Disponível em <http://www.youtube.com/watch?v=CT-zUnpuGgM>.

A preocupação quanto ao uso das analogias se tornarem confusas aos alunos, fazendo com que compreendessem mais o análogo que o conceito, fez com que os questionassem se achavam que o fenômeno descrito no filme fosse possível de ser realizado de fato. Ao que me responderam negativamente, pois as notas explicativas presentes no capítulo 3 de nossa leitura foram precisas em mostrar o conceito físico apropriado quanto aos termos estudados. No final do capítulo 3, há uma explicação mais formal a respeito dos termos e conceitos sobre MQ abordados, por exemplo:

A mecânica quântica não se refere a partículas definidas no sentido tradicional clássico; em vez disso, trata de estados e amplitudes. Se você eleva ao quadrado uma amplitude, isto é, multiplica pelo seu próprio valor, você obtém uma distribuição de probabilidades que dá a probabilidade de se obter vários resultados ao se fazer uma observação ou medição (GILMORE, 1998, p. 57).

Por fim, o autor de Alice no País do Quantum, prepara o leitor, ao final do capítulo 3, para inseri-lo na discussão do problema da medida quântica, abordando no capítulo seguinte a interpretação da escola de Copenhague. Contudo, essa é uma outra história, pois nosso objetivo era analisar apenas a contribuição dos três primeiros capítulos na formação de conceitos de mecânica quântica. Todavia, vale relatar que muitos alunos terminaram a leitura do livro por conta própria, inclusive me procurando, ao longo daquele ano letivo, para discutir outros assuntos relacionados à FMC.

Ao final de nossas leituras, constatou-se que os alunos aprovaram a metodologia empregada, gostaram e afirmaram ter achado tudo muito curioso e estranho, principalmente por saber que existe um mundo assim paralelo ao deles. No tópico seguinte, vamos analisar como esses alunos puderam se beneficiar dessas leituras na formação de conceitos físicos.

4.5 – E DEPOIS DA LEITURA...

Após a leitura dos três capítulos de *Alice no País do Quantum* (GILMORE, 1998), foi entregue aos alunos um questionário aberto, anexo III, visando coletar suas impressões, bem como avaliar a proposta didática abordando física e literatura, além de verificar aspectos referentes ao uso de analogias como recurso para apreensão de conceitos físicos. Como instrumento de avaliação os alunos responderam a um grupo de questões de física, anexo V, sendo pertencentes a um simulado, onde constaram questões, também, sobre química e biologia, contudo, apenas as questões de física fazem parte do anexo V, sendo analisadas ao final.

As respostas obtidas (anexo IV) indicam que os alunos apoiaram o uso da literatura como ferramenta de ensino de FMC e elementos de MQ. Compreenderam o caráter abstrato e imaginativo presentes na física, por meio da conversão, ou transformação, da leitura, que criou inicialmente pseudoconceitos, em conceitos físicos adequados pelas aulas ministradas e pelos recursos de TIC utilizados. Mesmo os alunos que manifestaram abertamente não gostar de ler, acharam a proposta interessante, sendo que, para esses, os vídeos apresentados foram mais bem compreendidos, em suas opiniões, uma vez que não precisavam ler. Acharam que apenas assistindo uma interpretação pronta dada pelos vídeos já era suficiente para compreenderem alguns conceitos. Entretanto, a maioria opinou mais favoravelmente à leitura, por permitir

melhor abstração dos fenômenos físicos estudados, enquanto outros salientaram a importância da interação entre ambos.

A fim de melhor verificar as respostas de nossos alunos, propomos uma análise por categorias, o que nos permite buscar uma melhor compreensão dos resultados obtidos através do questionário (anexo III) e suas respostas (anexo IV).

1ª Categoria – O cenário real

Nessa categoria buscamos avaliar a compreensão dos alunos dentro de um contexto social, político, histórico e filosófico, por meio da análise da questão 01 (anexo III) assim formulada: A leitura introdutória do capítulo XVIII – Feiticeiros e Aprendizes, da Era dos Extremos, de Hobsbawm, foi pertinente para compreensão inicial, e entendimento da importância dos estudos sobre a Física Moderna?

Abaixo podemos observar algumas respostas dos alunos (anexo IV) sobre a questão 01 citada (anexo 3), onde podemos verificar que os alunos compreenderam, em parte, o papel social, histórico, político e filosófico que a física possui, além de terem percebido suas relações e implicações para a vida cotidiana. Vamos verificar nas respostas cada um desses papéis. Sobre o contexto histórico as respostas abaixo ilustram a compreensão adquirida:

“Serviu de base para entender o contexto histórico da evolução da física moderna, que de início era uma física sem fundamento, já que não eram comprovadas, ao contrário da física clássica” (aluno 05).

“Através da explicação do contexto histórico da transição da física clássica para a física moderna foi possível obter um melhor entendimento de como surgiu a necessidade de estudar o mundo quântico” (aluno 09).

“Os entendimentos sobre todos os ramos da física, como a física moderna, precisam ser estudados desde as primeiras teorias, para compreendermos como um todo e não apenas o conceito final” (aluno 10).

“Sim, pois nos possibilitou aprofundar na história da Física Moderna, ou seja, aprendemos mais a teoria e sobre a utilidade da física em nosso cotidiano, o que acaba por facilitar o entendimento e até a resolução de contas” (aluno 36).

Como é possível verificar nas respostas dos alunos 05, 09, 10 e 36, o aspecto histórico abordado na leitura foi percebido como importante para o desenvolvimento do papel da física em outros contextos culturais. Saliente-se a resposta do aluno 05 que percebeu que a FM era diferente da física clássica. E a resposta do aluno 10, chamando a atenção para a importância do texto estudado que lhe permitiu uma compreensão global da física em diversos contextos, ao invés de apenas um conceito pronto, final, como apresentado de costume. Tal compreensão precisa ser salientada, pois certa percepção sobre um processo de conhecer parece ter se instaurando, o que pode promover o rompimento de um conhecimento pronto e acabado, como são apresentados nos livros textos escolares (GUERRA; MENEZES, 2009).

Sobre o papel da importância social da FMC apresentamos as seguintes respostas:

“O modo que o autor relacionou a ciência ao cotidiano foi muito eficaz para instigar minha curiosidade e interesse” (aluno 18).

“Lendo esse capítulo eu compreendi de uma forma geral a importância da física moderna” (aluno 23).

“Sim, neste capítulo Hobsbawm deixa claro que **a física não é apenas cálculos e sim, tudo o que se passa em nosso cotidiano**, como a guerra, em que é citada a criação das bombas, ou de novas armas mais potentes com muitos tiros por segundo, entre outros. Tudo isso envolve a física moderna, por causa da tecnologia e uma boa compreensão inicial onde tudo está relacionado com a matéria” (aluno 34, grifo meu).

“Sim, pois pudemos evidenciar pela leitura como os estudos da física moderna são importantes para a nossa sociedade” (aluno 44).

Nessas respostas, os alunos mostraram ter compreendido o papel social que a física possui, como dito pelo aluno 18. Ajudou também a instigar a curiosidade, permitindo ter mais interesse na disciplina, demonstrando que a física possui outros

aspectos além das fórmulas apresentadas, como dito pelo aluno 34, percebendo que há implicações políticas também, como situações de guerras e desenvolvimento de armas de destruição em massa. Em geral, podemos observar que compreenderam a importância social que a física possui, enquanto construção histórica e como atividade social humana, como apontado em Brasil (1998, p. 27-28).

O caráter filosófico foi percebido pelas quebras de paradigma e mudanças de pensamento, como ilustram as respostas a seguir:

“A leitura deu uma base para a melhor compreensão da matéria dada em aula e mostrou pontos novos que muitos não haviam pensado” (aluno 13).

“Sim. Foi pertinente, porque através dela pode se ver como foi difícil a aceitação da Física Moderna, que ia contra tudo que os físicos sabiam até então. Apresenta, também, suas principais ideias, seus paradigmas, os estudos realizados por vários físicos e seu impacto sobre a sociedade, conceitos, entre outros, o que tornou a física moderna mais “clara”, mais compreensível, o que é difícil no primeiro momento que entramos em contato com ela” (aluno 15).

“Sim, porém só me serviu para entender a virada ocorrida na física ao longo do tempo e como foram feitas as teorias, não aprendi a aplicá-las até aquele momento” (aluno 24).

As respostas desses alunos mostram que o desenvolvimento da física passa por mudanças de pensamentos como salientado pelo aluno 15, sendo necessário muitas vezes romper com paradigmas. Permitiu aos alunos a compreensão de que os conceitos físicos surgiram de um esforço intelectual por mudanças de pensamento.

Alguns extremos foram selecionados demonstrando que para alguns alunos todo o contexto social, político, filosófico e histórico que a física possui é muito novo para eles, podendo confundi-los, uma vez que não estavam acostumados a ter essa visão mais global dos aspectos físicos. Seguem alguns exemplos:

“A leitura do capítulo XVIII acabou confundindo, mesmo eu já tendo estudado ela por outros meios. Teve fatos curiosos e interessantes ao longo da leitura, mas foi uma leitura maçante” (aluno 06).

“Sim, nos ajudou a compreender em si as teorias da física moderna, mas também é um texto que engloba muitos aspectos juntos, deixando o texto mais pesado de se ler” (aluno 41).

Os extremos salientados acima parecem indicar um forte laço por parte desses alunos com a semicultura, como apontam Horkheimer e Adorno (1985), uma vez que sua formação escolar não lhes permitiu ter acesso a um conhecimento mais global ao longo de suas experiências escolares, tendo sido acostumados a apenas realizar uma física pragmática de resolução de exercícios matematizados. Ao entrarem em contato com a leitura enfocando os caracteres sociais, políticos, filosóficos e históricos que a física possui, assustaram-se, caracterizando a leitura como maçante ou pesada, como eles mesmos afirmaram.

Uma visão oposta a essa é verificada na resposta do aluno 42 abaixo:

“Sim, pois nos pode dar uma base melhor sobre a física moderna na teoria, de um jeito diferente, abrangendo o tema de um modo mais complexo e interessante” (aluno 42).

Ressaltamos que enquanto os alunos 06 e 41 acharam a leitura maçante e pesada o aluno 42 interpretou esse aspecto como positivo, ao salientar que o tema é complexo, porém, interessante. E, apesar da leitura ter sido pesada ou maçante na visão dos alunos 06 e 41, eles perceberam a importância da mesma, ao afirmarem fatos curiosos e interessantes, além de ter ajudado a compreender a história da física moderna. No fundo, esses extremos parecem um misto de assombro e fascínio pela percepção das relações da literatura com a física, sendo que ao longo de suas vidas escolares não tiveram acesso a um ensino de física mais abrangente.

2ª Categoria – O papel da literatura no ensino e aprendizagem da física

Nessa categoria selecionamos as questões 02, 03 e 07 do anexo III e as respostas, anexo IV, a fim de verificar como os alunos interpretaram o uso da literatura, da leitura, das narrativas, figuras de linguagem, quanto à melhoria no ensino e aprendizado da física. Serviu-nos, também, para avaliar de que forma essa interação literatura-física pôde aproximá-los dos conceitos físicos estudados.

Nas primeiras respostas selecionadas abaixo, podemos verificar que os alunos afirmaram terem tido maior entendimento dos conceitos físicos estudados através da literatura.

“Sim. Mesclar literatura com a física ajuda bastante a “entender” a física, pois nos mostra de uma forma diferente os conceitos. **Prende mais nossa atenção**” (aluno 01, grifo meu).

“É possível mesclar física com a literatura, pois o entendimento do leitor sobre física torna-se mais fácil, principalmente se a física for assimilada por uma história já conhecida, mesmo que confusa para entender, facilita a compreensão” (aluno 05).

“É possível mesclar a física com a literatura. Em Alice no País do Quantum são explicadas as teorias da física moderna através de alegorias e modelos, assim **facilitando o entendimento básico dos modelos e teorias da física moderna, como a superposição de estados quânticos**” (aluno 09, grifos meus).

Outras respostas também exemplificam que a compreensão conceitual dos tópicos de FMC foi potencializada por meio do uso da literatura.

“Sim é possível, com a ajuda da literatura acaba deixando o conceito mais fácil de entender, além de ser uma forma prática de aprendizado para alguns”. “Sim, pois **muitos têm dificuldade em aprender o conceito só com fórmula e o uso desses artifícios ajuda no entendimento da matéria**” (aluno 02, grifos meus).

“Foi muito útil o uso da literatura nos estudos físicos, principalmente no meu caso que tenho um pouco de dificuldade com matérias exatas, **com a leitura consegui absorver muito mais conceitos da física, de modo que me proporcionou maior entendimento da matéria e um aprendizado mais eficiente**” (aluno 04, grifos meus).

“Considero sim, nunca havia trabalhado a física com a literatura, e **confesso que após as leituras tenho tido muito mais facilidade no entendimento e aplicação. E com isso me aproximei dos estudos da física**” (aluno 44, grifos meus).

Em todas as respostas acima é possível constatar que os alunos afirmam terem tido maior entendimento dos tópicos estudados por meio da articulação entre física e literatura.

Ainda confirmaram ter melhorado seu aprendizado, como o caso citado pelo aluno 04, que sentiu ter absorvido mais conceitos, maior entendimento e aprendizado mais eficaz. Ou como o caso do aluno 09 ao externar ter tido mais facilidade no entendimento de modelos científicos e teorias da FMC, como o conceito da superposição de estados quânticos. É oportuno, portanto, lembrar da publicação *Journal of Research in Science Teaching* (1994), em número especial, chamado de “*The Reading – Science Learning – Writing Connection*”. Essa publicação trata especificamente do ensino da ciência, leitura e produção da escrita, além de outros autores que salientam o papel da leitura e da palavra como representação de conceitos científicos, tais como Almeida; Silva; Machado (2001), Barbosa-Lima (2006), Nascimento; Paula; Lima (2010), Nigro; Trivelatto (2010), Padilha e Carvalho (2011), entre outros.

O interesse maior, a curiosidade e o prazer em estudar física, também foram mensurados por vários alunos, como destacam as respostas abaixo, onde as palavras diversão, interesse e divertido atestam essa percepção:

“É uma forma mais **divertida** de aprender e mais fácil também” (aluno 05, grifo meu).

“Sim, pois como a física também conta com grande conteúdo conceitual, a literatura pode trabalhar em cima disso, para que os estudos possam ser mais **atrativos** por conta do uso de alegorias literárias”. “Sim, porque a física pode contar com tais artifícios para ser ainda mais **interessante**” (aluno 29, grifos meus).

“Sim, porque mesclando a física com a literatura fica mais fácil para compreender e até mais **interessante e divertido**” (aluno 30, grifos meus).

“**Causou interesse e curiosidade**. Gosto mais de literatura que de física e com essa oportunidade **me aproximei mais dos conceitos físicos**” (aluno 03, grifos meus).

Sobre essas respostas torna-se oportuno lembrar da segunda tese proposta por Mecke (2004): “*Os físicos como personagens literárias: As **narrativas e a literatura tornam a física interessante e emocionante**. Contribuem, portanto, para motivar e para tornar a disciplina mais atraente*” (2004, p. 11, grifos meus). É claro que para esses alunos o uso da literatura como ferramenta de ensino de física proporcionou uma porta de entrada, uma aceitação, para os estudos de FMC e MQ tratados com eles, permitindo que se aproximassem mais da física.

Abaixo selecionamos quatro respostas que indicam até mesmo o prazer em se estudar física, que jamais havia sido mencionado por esses alunos de 3º ano de EM, o que parece ir contra certa predisposição que indica, justamente, o contrário, ou seja, alunos de 3º EM, em geral, parecem ter muito mais apatia pela física do que alunos de 1º EM, como indicado por D’Agostín et al. (2006). Pelas respostas dadas acima, há um indicativo de que essa aversão pela física tenha se transformado em empatia, entusiasmo, uma vez que o uso da literatura, e a própria narrativa de *Alice no País do Quantum* proporcionaram maior interesse pelos estudos dos conceitos abordados. Outros exemplos reforçam nossa percepção:

“A teoria física mesclada a uma história interessante nos ajuda a focar e compreender melhor a matéria que está sendo passada no livro e torna o estudo em algo mais leve e **prazeroso**” (aluno 13, grifo meu).

“É válido mesclar a física com a literatura, melhorando meu aprendizado sobre os conceitos físicos estudados, uma vez **que a literatura faz com que as ideias se tornem mais claras, abordando um método mais interativo, divertido, o que facilita a assimilação de informações e dá aos jovens gosto pela aprendizagem**, já que muitas vezes, apenas a fala não serve de motivação” (aluno 15, grifos meus).

“Sim, o método utilizado na alegoria foi bem **didático e prazeroso**, tornando uma leitura que poderia ser chata em legal, levando a uma melhor explicação” (aluno 37, grifos meus).

“Sim. A literatura fez com que o meu entendimento sobre a física aumentasse, fazendo, assim, **aumentar o meu gosto pela mesma**” (aluno 39, grifo meu).

É interessante ressaltar que apesar das questões 02, 03 e 07 (anexo III) não perguntarem diretamente se a metodologia empregada tenha tido alguma relação com o aumento do prazer em se estudar física, verificamos que vários alunos interpretaram seu maior entendimento dos conceitos físicos estudados, por meio da literatura, com o aumento da curiosidade e do prazer em se estudar física. Isso propiciou, inclusive, maior interesse no estudo da física por parte desses alunos, aumentando sua motivação. Palavras como gosto, mais interessante, prazerosa, divertida e curiosa foram frequentes nas respostas dos alunos, o que nos fornece um indicativo de que a metodologia empregada aumenta o interesse no estudo da física por parte desses jovens de EM.

Além dessas respostas fornecerem indicativos de melhor entendimento dos conceitos físicos estudados, outra palavra muito utilizada pelos alunos remete ao aumento da compreensão, da criatividade e da imaginação nos estudos, além da abstração dos conceitos físicos por meio das leituras realizadas; como bem atestam as respostas abaixo:

“... A utilização de recursos linguísticos torna mais fácil a compreensão da física no geral, a moderna e a clássica” (aluno 09).

“Foi bom, já que **pude ter uma melhor abstração do conteúdo**, com o uso da literatura **foi mais fácil compreender o conteúdo explicado durante as aulas**” (aluno 09, grifos meus).

“Acredito que antes eu não entendia verdadeiramente a física como agora. Claro que não é possível compreendê-la por completo, porém o uso da literatura auxiliou e muito esta compreensão” (aluno 10).

E, ainda outros alunos salientaram a imaginação presente na literatura como precursora de um melhor entendimento dos conteúdos de MQ, facilitando a abstração desses conceitos, como exemplificam as respostas abaixo:

“O uso de outros recursos linguísticos para estudar a física, como leitura e narrativas, **faz ser possível imaginarmos um outro mundo onde podemos interagir com a história e esta nova percepção de mundo**, em que **conseguimos enxergar com**

clareza o que os físicos tentam explicar através de fórmulas” (aluno 10, grifos meus).

“Sim. Com o uso da imaginação as teorias físicas ficam mais simples e o entendimento foi mais amplo, como por exemplo, a analogia usada no paradoxo do gato facilitou meu aprendizado” (aluno 27).

“Sim, porque através de textos, figuras de linguagem, entre outros é que você imagina a situação citada no texto e **abstrai os conceitos passados**” (aluno 38, grifos meus).

Pelas respostas apresentadas acima, confirma-se que para os alunos houve um aumento na compreensão da física, além do desenvolvimento de uma das funções psíquicas superiores, a abstração, que foi desenvolvida, como alegam os alunos 09 e 38. Saliente-se a resposta do aluno 10, que afirma ter melhorado sua compreensão conceitual, ao compreender o que as fórmulas representam; ou, a compreensão conceitual do paradoxo do gato de Schrödinger, dada pelo aluno 27.

Vários outros alunos também comentaram, dentro dessa categoria, sobre o excesso de algoritmização, ou contas como eles mesmos chamam, no estudo da física. Esses alunos constataram o excesso desse aspecto técnico da física como fator negativo e desmotivante em seus estudos na disciplina. Muitos citaram essa algoritmização como contraexemplo da metodologia empregada, afirmando que por meio da literatura e seus recursos linguísticos tiveram facilidade, também, no estudo técnico, ou, nas palavras dos alunos, que ajudou também a fazer as contas, por ter permitido melhor compreensão conceitual, o que não era percebido por eles utilizando-se apenas do caráter técnico. As respostas abaixo ilustram essas afirmações.

“Sim, pois **somente contas a matéria torna-se automaticamente entediante e cansativa**” (aluno 04, grifos meus).

“Sim, porque **é muito mais difícil a aprendizagem por meio de uma linguagem técnica, que quase ninguém entende**. Esses “elementos” nos ajudam a entender uma mesma ideia que aprendemos em sala de aula, porém de forma mais fácil, com coisas que conhecemos em nosso dia a dia” (aluno 15, grifos meus).

“Sim, pois muitas vezes **tenho dificuldade na compreensão da linguagem matemática, e a literatura me ajudou muito neste sentido**” (aluno 29, grifos meus).

“Com certeza, **pois a física não é somente cálculos**, ela envolve todo um conceito teórico, prático e um completa o outro”. “A leitura me ajudou a compreender os conceitos, **mas ajudou na introdução do cálculo**” (aluno 32, grifos meus).

Essas respostas sugerem a necessidade de uma mudança metodológica no ensino de física. Como criticado por Nory e Zanetic (2005), esse excesso de algoritimização deve ser no mínimo complementado com um ensino de física mais atraente aos alunos. E, de acordo, ainda, com Guerra et al (1998) é necessária uma proposta que traga uma mudança nessa “*visão conteudista e **exageradamente matemática** que impera no ensino*” (p. 38, grifo meu), elaborando uma nova abordagem, sem anular completamente a linguagem matemática necessária ao entendimento e aplicação dos conceitos físicos estudados. Para Pessoa Júnior (2003), uma abordagem mais intuitiva e menos matemática é um caminho possível, uma vez que pode possibilitar um entendimento de diferentes interpretações históricas e epistemológicas plausíveis para a Teoria Quântica.

Essa nova abordagem pode ser obtida pelo uso da literatura no ensino de física, como percebido pelos alunos ao atestarem a facilidade maior em seus estudos de física, como se verifica nas respostas abaixo:

“A leitura serviu como base para entender que quando trabalhamos com a literatura e física junto a compreensão fica muito mais fácil, pois entendemos a ideia”. “Sim, pois foge da igualdade didática que é apenas o estudo de fórmulas” (aluno 28).

“O uso da literatura em geral pode ser muito proveitoso para a física, eu penso da seguinte forma: - **Física não é só fórmulas, existe uma teoria por trás de cada fórmula e a literatura ajuda a aprendermos essas teorias**” (aluno 35, grifos meus).

“Sim, através da leitura de Alice no País do Quantum pude compreender muito mais o conteúdo. **A explicação da teoria, que existe por trás das fórmulas que nos são apresentadas, proporcionou maior conhecimento e acabou por facilitar na compreensão e aplicação de exercícios de cálculos.** Eu diria que foi um texto muito esclarecedor e facilitador” (aluno 36, grifos meus).

Constata-se pelas respostas dadas por esses alunos que perceberam o excesso de cálculos no ensino da física, como a resposta do aluno 35 ao afirmar que “*física não é*

só fórmulas”, e que o emprego da literatura ajudou a compreender as teorias estudadas. Essa ajuda é verificada na resposta do aluno 32, ao citar que a leitura facilitou também na introdução do cálculo. Essa percepção deve-se ao fato de que a leitura realizada forneceu subsídios à formação da compreensão conceitual, que, por sua vez, facilitou a resolução de exercícios mais formais. Uma resposta mais extremista, dada pelo aluno 04, liga o aspecto formal da resolução de exercícios a fatores entediantes, chatos e desconectados da realidade concreta. Apesar dessa resposta mais dura, a maioria dos alunos percebeu que a metodologia usada teve um papel facilitador na compreensão conceitual e também na aplicação de exercícios de cálculos, como bem afirma a resposta do aluno 36.

Outro aspecto que emergiu das respostas dessa categoria diz respeito a uma sensação de admiração e participação por parte dos alunos, adjetivando a metodologia empregada com palavras como boa, proveitosa, interessante e maravilhosa. As respostas abaixo ilustram esses aspectos:

“A leitura ajudou com dúvidas que foram surgindo e logo após explicadas e debatidas com o professor”. “Nunca havia tentado esse método. É cansativo, porém, interessante em alguns pontos. É proveitoso não apenas na física quântica. **Queria poder ter usado o método em física clássica**” (aluno 24, grifos meus).

“Sim, o autor teve muita criatividade de unir uma literatura muito conhecida hoje em dia com conceitos mais complicados da física quântica. Assim como ele, **outros autores poderiam fazer livros assim, para incentivar o aprendizado**” (aluno 41, grifos meus).

“Sim, da forma que eu pude entender melhor como funcionam os conceitos estudados de uma forma mais descontraída, de uma forma **onde eu pudesse fazer minha interpretação em cima do que me foi apresentado**” (aluno 42, grifos meus).

“Sim, pois com o livro conseguimos entender melhor, já que a matéria é difícil e com o livro conseguiu explicar bastante a física colocando-a com **exemplos maravilhosos**” (aluno 46, grifo meu).

Como ressalta a resposta do aluno 24, há um lamento em relação ao não emprego dessa metodologia nos seus anos anteriores ao 3º EM, ao afirmar que “*queria*

ter usado o método em física clássica”. O aluno 41 chega a fazer um chamado para que outros autores escrevam trabalhos utilizando a literatura para incentivar o aprendizado dos alunos. O aluno 42 ressalta em sua resposta que ele teve a oportunidade de ser protagonista de seu aprendizado ao ter a possibilidade de interpretar o que lhe foi apresentado. E, a admiração do aluno 46, demonstra como foi aceitável a metodologia usada no estudo dos conceitos sobre FMC.

3ª Categoria – O cenário Ficcional

Nesta categoria vamos analisar o papel da imaginação, como ela é importante tanto para a literatura quanto para a física, avaliando de que forma os alunos interpretaram e compreenderam a relevância da imaginação na construção de modelos científicos, e na formação da abstração e dos conceitos físicos estudados, por meio das respostas (anexo IV) às questões 04, 05 e 06, do anexo III. As respostas a seguir são ilustrativas do tema:

“Sim, para a física também é importante, porque se não conseguimos imaginar, não vamos entender bem a física. Ambas são essenciais para compreender o que está sendo lido, estudado” (aluno 01).

“A imaginação é muito importante, quando estamos aprendendo ou lendo algo ela que faz meio um “filme” que auxilia no entendimento e quando precisamos, cria ou reescreve o que aprendemos é a imaginação que faz as ideias fluírem para ter um bom resultado” (aluno 02).

“Na ciência e na literatura há o real e o imaginário, e as vezes através da literatura fica mais fácil de se compreender. Em ambas tem que haver imaginação e criatividade” (aluno 03).

Verificamos através dessas respostas que os alunos entenderam a importância da imaginação para elaboração e compreensão dos conceitos físicos. Alguns trabalhos como os de Carvalho e Zanetic (2004; 2005), Gurgel e Pietrocola (2008; 2011), Paula e Borgens (2008) e Watanabe e Gurgel (2011), apontam para relações entre a física e a

imaginação, e sobre a importância de explorar mais o imaginário dos alunos, como discutido por Gurgel e Pietrocola (2011).

O papel da imaginação para a literatura se justifica na elaboração das metáforas, analogias e alegorias para as narrativas literárias, enquanto para a física ela é fundamental para a elaboração de modelos científicos, de seus experimentos de pensamento ou das leis passíveis de generalizações. A articulação entre física e literatura pode trazer uma nova abordagem para o ensino de física, que permita explorar a imaginação dos estudantes, as respostas abaixo indicam essa aproximação:

“Com a imaginação podemos criar/desenvolver novas hipóteses e outros pontos de vista. Por meio da leitura vamos criando uma imagem em nossas mentes, principalmente quando se trata de física quântica, que muitas vezes, não há compreensões. Podem ser entendidas da mesma forma, pois ambas mostram as transformações do mundo e da cabeça das pessoas. Ambos fazem parte da história mundial, em ambos os casos fazem parte da história, e as duas necessitam de muita criatividade” (aluno 05).

“Qualquer forma de aprendizado deve ser considerada importante. E a imaginação é a melhor forma de se obter conhecimento, então não importa se é imaginação literária ou científica, porque ambas tem a mesma importância” (aluno 12).

“A imaginação é sempre fundamental para poder criar uma boa imagem da leitura, mas na física a imaginação tem que ser usada de uma forma sabia para não ser colocado o tema de uma forma exagerada e muitas vezes falsa” (aluno 31).

Nas respostas dadas por esse grupo de alunos podemos constatar que o papel da imaginação foi interpretado como importante tanto para a literatura, quanto para a física, fornecendo, inclusive, a possibilidade de participação do estudante, como ilustra a resposta dada pelo aluno 05, ao afirmar que com a imaginação é possível o desenvolvimento de pontos de vista diversificados. Já o aluno 31 cita sua preocupação com a possibilidade de reificação da analogia por meio da imaginação, isto é, alerta para que se tenha cuidado ao introduzir a imaginação de forma a conduzi-la para o ensino do conceito físico estudado, evitando a interpretação da aparência como fenômeno.

Sobre a importância da imaginação no ensino de física recordamos algumas propostas de ensino apresentadas por Barros e Terrazan (2004), Guerra e Menezes (2009), Lopes e Salomão (2009), Pinto e Raboni (2005), entre outros, que articulam a imaginação, a leitura e a interpretação com o ensino de física, possibilitando o despertar da imaginação nos alunos.

A importância da imaginação científica e da imaginação literária foi ressaltada por outros alunos, os quais conceberam a imaginação desenvolvida pelo cientista como mais difícil do que aquela utilizada na literatura.

“Não. Creio que a imaginação científica seja mais árdua e complexa, o que não desvaloriza a relevância da imaginação poética, porém a ciência é mais difícil por necessitar de mais criatividade” (aluno 04).

“A imaginação científica exige uma maior capacidade de imaginação, já que é mais complicado imaginar um fato científico do que um fato ocorrendo em um livro de poesia” (aluno 06).

“A imaginação científica acaba por se tornar até mais importante que a literária, já que através dela observamos o fundamento de teorias que revolucionam a física” (aluno 09).

Muitas respostas como essas demonstram que os alunos não compreenderam as analogias como verdades absolutas, o que é bom, pois não as reificaram, tendo-as como simples representações, criadas pela imaginação humana para o auxílio de um pensamento mais abstrato, necessário ao desenvolvimento dos modelos científicos. Por compreenderem a física como uma ciência difícil de estudar, os alunos assimilaram o papel imaginativo, também, como mais difícil de realizar, e interpretaram o pensamento científico como responsável pelo próprio desenvolvimento da física, dando, portanto, a esse tipo de imaginação uma relevância maior. Isso não significa que menosprezaram a importância da imaginação poética ou literária, como bem ilustra a resposta do aluno 04, mesmo concebendo a imaginação científica mais complexa não menospreza a imaginação poética.

A respeito da importância da imaginação no desenvolvimento de modelos científicos, é possível verificar nas respostas abaixo, como os alunos interpretaram seu papel para esse fim:

“Sim. A imaginação colabora para criar os modelos na ciência” (aluno 08).

“O livro Alice no País do Quantum mostra isso, há um capítulo que apresenta uma sala onde a imaginação se “concretiza” e o cientista clássico imagina um modelo para mostrar à Alice a teoria da luz ser onda” (aluno 09).

“Sim, porque a literatura faz com que imaginemos a física e seus modelos, ou seja, que imaginemos a ciência, de um modo que possamos entendê-la claramente, mostrando que ela tem características abstratas e imaginativas” (aluno 15).

“Sim, ambas são importantes, na física a imaginação resulta nos modelos, como a representação de um elétron como sendo uma bolinha, mas o elétron não é uma bolinha” (aluno 26).

“Sim. A imaginação é responsável pelo entendimento completo. Analogias são bem aproveitadas, principalmente em física, ao conseguir imaginar uma teoria, um modelo, consegue-se assimilar os conceitos” (aluno 27).

É possível verificar nas respostas fornecidas por esses alunos que houve a compreensão de que a imaginação desempenha importante papel no desenvolvimento de modelos científicos. Os alunos distinguiram bem a imaginação científica, como responsável pelos modelos científicos, da imaginação literária, responsável pelas metáforas. Como já citado em Mecke (2004): “*Na rotina do nosso cotidiano de físicos esquecemo-nos frequentemente de que **são as metáforas**, e não as fórmulas, que constituem **a espinha dorsal do pensamento***” (p.11, grifos meus). A resposta do aluno 26 bem ilustra essa compreensão, pois entende que na física a imaginação é responsável pela criação de um modelo representativo, o que na literatura poderia ser chamado de metáfora. Conforme observa esse aluno, a bolinha representa um elétron, contudo bem entende que a bolinha não é o elétron de fato e sim um modelo, uma representação, uma metáfora.

O papel da imaginação no desenvolvimento do pensamento abstrato e na formação de conceitos físicos, está presente nas respostas abaixo:

“A imaginação é fundamental para escrever qualquer tipo de história. No caso da física é necessária muita imaginação para conseguir abstrair os conceitos e tornar isso mais fácil de visualizar a teoria. **Abstrair sentimentos e torna-los histórias é tão difícil e importante quanto fazer o mesmo com a ciência e torna-la em teorias**” (aluno 13, grifos meus).

“Sim. Principalmente com a física quântica, muitas coisas parecem abstratas, porém são imaginativas. E com a literatura é possível verificar essas características” (aluno 14).

“Sim, assim como no livro Alice no País do Quantum, mostra que toda a criatividade imposta no livro é abstraída por nós e nos trás um entendimento mais claro” (aluno 41).

“Sim, como podemos ver, por exemplo, no livro Alice no País do Quantum, onde é mostrado através de analogia que a ciência pode ser contextualizada de um jeito diferente de como estamos acostumados, englobando a imaginação e a abstração” (aluno 42).

Alguns alunos relacionaram também o papel da imaginação no desenvolvimento de conceitos físicos e experimentos de pensamento, afirmando a facilidade da abstração destes conceitos presentes na literatura para a formação de conceitos físicos, isto é, confirmam o surgimento dos pseudoconceitos e da abstração por meio das leituras realizadas, como ilustram as respostas a seguir:

“A imaginação é importante, tanto para a literatura quanto para a física. Imaginando fatos e acontecimentos, imaginando um enredo, escreve-se uma história, na física a imaginação possibilitou a constituição de paradoxos que facilitam a visualização de teorias, como o paradoxo dos gêmeos e o gato de Schrodinger” (aluno 09).

“É por meio da imaginação que se criam as melhores histórias. Criar obras literárias sem imaginação é o mesmo que criar uma literatura sem vida, pois a imaginação nos faz viajar para outro mundo, um mundo só seu, conhecer novas realidades, criar um universo fantástico, tornando a leitura mais divertida e fazendo com que ela penetre neste mesmo mundo. A imaginação também é importante para a física, pois sem ela, muitos físicos não teriam descoberto coisas que existem hoje, e, além disso, com a imaginação podemos criar modelos para ajudar a entender melhor a realidade. Sem a imaginação não haveria o gato de Schroedinger, porque foi preciso imaginar o gato dentro da caixa para entender o conceito de superposição de estados” (aluno 15).

“Sim, pois a literatura permite ao leitor viajar em sua imaginação e com a junção dela com a física, a ação das partículas, por exemplo, se torna mais compreensível” (aluno 11).

A imaginação no desenvolvimento das funções psíquicas superiores, memória lógica, atenção deliberada e abstração, tem seu papel estabelecido na compreensão dos alunos pelas respostas acima. Esses alunos bem compreenderam que através da leitura puderam abstrair os conceitos físicos sobre FMC estudados, afirmando terem compreendido que a imaginação possibilitou a compreensão e o desenvolvimento dos conceitos mencionados, como a superposição de estados quânticos, as partículas elementares e os paradoxos dos gêmeos e do gato de Schrödinger.

Sobre a relevância da imaginação no desenvolvimento da abstração, e da sua importância na resolução de problemas e exercícios, podemos avaliar nas respostas abaixo, que vários alunos conceberam a abstração literária como fomentadora de melhor compreensão, o que, conforme eles mesmos indicam, auxiliou no ato de resolver exercícios e entender as fórmulas matemáticas.

“Sim. O entendimento que a ciência é uma coisa fria e calculista é uma ideia criada pela analfabetização científica da sociedade. Sim. É de suma importância a abstração na hora de resolver exercícios” (aluno 18).

“Nos faz viajar, nos ajuda a imaginar as fórmulas” (aluno 20).

“Todos os conceitos físicos só surgem através de cálculos matemáticos após terem passado pela imaginação de alguém antes de concretizá-lo. Sim, pois **da mesma forma que quando lemos um livro, imaginamos todo o cenário e os personagens propostos, então, quando vemos conceitos físicos, também podemos imaginar o cenário proposto**” (aluno 29, grifos meus).

“Sim, na literatura usamos a imaginação para criarmos o cenário, as personagens e entre outras coisas. Na física é muito importante a imaginação na hora de resolver um problema, na visualização do enunciado e da resolução.” (aluno 39).

Pelas respostas fornecidas acima podemos constatar registros a respeito das representações semióticas e funcionamento cognitivo por meio da conversão, conforme Duval (2005). A fala desses alunos demonstra suas interpretações sobre a formação de conceitos físicos através da literatura, da imaginação e da leitura, o que sugere a abstração dos conceitos físicos estudados. Recordando que de acordo com Duval (1993)

as representações semióticas, os signos, desenvolvem a comunicação e a cognição, sendo por meio dessas representações semióticas que o aluno exterioriza, comunica e objetiva seu pensamento sobre um ente mais abstrato. Talvez esse foi o motivo pelo qual, alguns alunos exteriorizaram seu pensamento sobre o fato da leitura e da imaginação, constante no enredo da narrativa de *Alice no País do Quantum*, tenha também melhorado suas compreensões a respeito das soluções de problemas matemáticos, isto é, comunicaram a conversão da representação semiótica da leitura para a linguagem mais abstrata, física e matemática.

4ª Categoria – Os atores: o papel das representações no cenário conceitual.

Nesta Categoria apresentamos as respostas dadas pelos alunos (anexo IV) sobre as questões 08 e 10 (anexo III). A fim de avaliarmos de que forma houve a compreensão das analogias e dos modelos como cenários de construção conceitual dos tópicos de FMC e MQ estudados, além de averiguar se e como os alunos assimilaram melhor os conceitos ensinados, se por meio da literatura, por meio dos vídeos ou pela interação entre ambos.

O papel das analogias ou das alegorias utilizadas em *Alice no País do Quantum*, articulando os conceitos de FMC e MQ, foram interpretados pelos alunos como modelos, construções dentro de um cenário conceitual que os levou a uma melhor compreensão dos fenômenos estudados, além de terem ressaltado o entendimento do papel dos modelos, como ilustram as respostas abaixo:

“Sim, pois **um modelo é uma representação da realidade, mas não realidade de fato**. É preciso que os cientistas tenham criatividade e imaginação para criarem”. (aluno 03, grifo meu).

“Sim, pois ninguém sabe a real forma dos elementos e personagens citados no texto, de fato o torna um modelo, uma analogia, tal como seus personagens” (aluno 04).

“Sim, pois **são representações de uma realidade**” (aluno 26, grifo meu).

“Sim, porque ele representa alguma coisa real que não sabemos como realmente é” (aluno 38).

Nesse primeiro subgrupo de respostas podemos verificar que os alunos bem compreenderam os riscos concernentes às analogias, ou seja, entenderam que tanto um modelo físico, quanto uma alegoria, são apenas representações de uma realidade. Outro subgrupo de alunos identificaram as analogias do livro *Alice no País do Quantum* como representações de conceitos físicos sobre FMC e MQ, como exemplificam as respostas abaixo:

“Sim, pois o autor usa a história da Alice como modelo para explicar a Física Quântica” (aluno 08).

“Sim, pois com esse tipo de analogia, alguns termos mais difíceis de se compreenderem, pertencentes à Física Moderna, se tornaram mais compreensíveis, pois o leitor agora cria um contexto, o que o **facilita a ter mais ideias e refletir mais sobre as teorias**” (aluno 11, grifo meu).

“Sim. Os modelos usados no livro auxiliam no melhor entendimento, utilizando personagens e mexendo com a nossa imaginação **fica mais fácil de visualizarmos os conceitos**” (aluno 27, grifo meu).

Outros alunos relacionaram a analogia com o melhor desempenho de sua aprendizagem, como indicado pelas respostas a seguir:

“Sim, elas podem ser usadas como modelos, **elas nos ajudaram com a aprendizagem**, serviu como base para nos ajudar a entender a física quântica” (aluno 14, grifo meu).

“Sim. As abordagens feitas pelo autor, as alegorias e analogias utilizadas, não são a realidade, foram apenas uma maneira que o autor encontrou para **facilitar o entendimento** do leitor para com a física moderna” (aluno 15, grifo meu).

“Sim, são modelos dos conceitos que nos são difíceis de entender, fazendo com que nós imaginemos as analogias e assim absorvendo o conceito” (aluno 41).

Nessas respostas podemos verificar que os alunos compreenderam o papel do modelo como uma representação, e não como o fenômeno, ou a essência de fato, o que nos leva a indagar se o uso de analogias pode fortalecer concepções alternativas

errôneas, como afirmam alguns autores como Cunha (2006) ou Souza, R e Souza, P. (2005).

Relembramos aqui da importância do papel de mediador do professor no processo de ensino e aprendizagem. Ao tomar cuidado com o uso dessas ferramentas e apresentar analogias como representações, como modelos que servem ao propósito de facilitar uma compreensão conceitual mais abstrata, a analogia pode ser usada pelo professor como uma ferramenta facilitadora ao ensino de física.

As respostas dos alunos acima atestam a validade desse recurso como ferramenta de ensino, além de vários trabalhos como os constantes na edição especial do *Journal of Research in Science Teaching*, de 1993, que trata exclusivamente de pesquisas sobre analogias, intitulada “*O papel da Analogia na Ciência e no Ensino de Ciência*”. Outros trabalhos como os de Kemper, Zimmermann e Gastal (2010) ou Terrazan (2013), que avaliam o uso de analogias para transpor conceitos concretos em abstratos, facilitando o entendimento dos alunos, também justificam o uso de analogias como facilitadora do ensino e aprendizagem dos alunos. Lembramos que a analogia é um dos recursos presentes na literatura, portanto, a articulação entre física e literatura também está presente, quando trabalhamos as analogias em sala de aula, por meio das interpretações das leituras realizadas e pelo constante trabalho em mostrar que as analogias são representações e não o fato em si.

Outros alunos, além de terem compreendido esse papel de construção conceitual fornecida pelos modelos, também citaram exemplos a respeito dos conceitos físicos estudados, como sugerem as respostas:

“Sim, por exemplo, os spins com guarda-chuvas para cima e para baixo, o coelho que tenta atravessar a porta (tunelamento de energia) e outros exemplos criados pelo autor podem ser considerados modelos” (aluno 09).

“Sim, pois ele representa uma coisa real, que nós não sabemos realmente como ela é, por exemplo, os elétrons” (aluno 32).

“Podem ser considerados modelos, **pois trata de representações impossíveis de serem visualizadas do ponto de vista macroscópico**. O princípio da incerteza mesmo comprova isso, e o livro da Alice também, pois ela não consegue conversar com um elétron parado” (aluno 33, grifo meu).

“Sim, pois tudo o que tem na obra se trata de uma representação do mundo subatômico, mostra muito bem o princípio da incerteza, quando Alice tenta conversar com um elétron parado e não consegue vê-lo” (aluno 35).

Essas respostas nos possibilita, de acordo com Duval (2005), constatar a conversão semiótica da leitura para o conceito físico, pois esses alunos, por meio da metodologia empregada puderam se lembrar de termos e conceitos de MQ, como spin, princípio de exclusão de Pauli, princípio da incerteza de Heisenberg, tunelamento e mundo subatômico, demonstrando o uso dessas palavras em construções de entendimento conceitual, que foi gerado pela leitura e compreensão das analogias como modelos e representações dos fenômenos físicos estudados.

A respeito dos recursos metodológicos, alguns alunos responderam ser a literatura a ferramenta que lhes permitiu melhor assimilação dos conceitos estudados, como verificado nas respostas abaixo:

“Eu acho mais importante a leitura, pois **cada um entende/interpreta de um jeito**. E assim cada um aprende de uma forma” (aluno 03, grifo meu).

“Sim, pois com o livro tento assemelhar a história da Alice com os conceitos da física, não é realidade, porém é uma forma de apresentação dos conceitos da realidade. Conseguimos uma melhor visualização dos assuntos abordados. **Eu julguei mais importante a literatura que garante abstrair os eventos**, assim podemos construir nossa opinião sobre o que estamos vendo” (aluno 05, grifo meu).

“A leitura, pois, essa nos permite fazer **nossas próprias observações** e definir por nós mesmos, **o que julgamos ser mais importante**” (aluno 22, grifo meu).

A principal justificativa de seus comentários existe no fato de terem concebido que a leitura permitiu que se tornassem participantes ativos de seu aprendizado, como protagonistas que puderam interpretar, fazer as próprias observações, além de permitir

um entendimento particular sobre os conteúdos abordados, ao invés de terem os mesmos sido transmitidos prontos e fechados como de costume, por meio de fórmulas, como descrito por Guerra e Menezes (2009). É importante ressaltar, também, que os alunos identificaram o papel da leitura e da palavra para representar e interpretar conceitos físicos, o que pode ser verificado nos trabalhos de Barbosa-Lima e Carvalho (2003), Barcellos e Zanetic (2007), Padilha e Carvalho (2011), Silva e Machado (2001), entre outros.

Outros alunos mencionaram os vídeos como mais importantes para o seu aprendizado. Todavia, parece que isso não coloca em risco a metodologia empregada, mas chama a atenção para percepções mais favoráveis à vídeos e/ou imagens como ferramentas complementares, uma vez que uma imagem, um vídeo, uma animação ou uma apresentação bem feita parecem trazer muito mais significado aos alunos que a simples leitura. Abaixo algumas respostas que ilustram esse pensamento:

“O vídeo ajudou muito a entender o conceito, **com o vídeo “clareou” as ideias** e pude observar como funcionam os conceitos. Pelo assunto ser mais complicado e exigir grande interpretação o vídeo é melhor que o texto, mas vale lembrar que o texto também ajuda” (aluno 06, grifo meu).

“Os vídeos ajudaram muito, pois **várias vezes não conseguimos visualizar o conceito na leitura e no vídeo você consegue**. Não tem o mais importante, porém com o vídeo o aprendizado é mais fácil. Você consegue entender mais facilmente, **com a leitura muitas vezes vêm várias coisas na sua cabeça e você não entende nenhuma**” (aluno 14, grifos meus).

Para esses alunos as mostras de vídeos possibilitaram complementar sua interpretação sobre os conceitos físicos abordados, facilitando suas representações semióticas, conforme Duval (1993), possibilitando que um mesmo objeto de estudo possa ser interpretado por vários outros sistemas semióticos, nesse caso os vídeos. Já para outros alunos, houve uma interpretação de que o vídeo traz os conceitos prontos, sem necessidades maiores de interpretação, como exemplificam as respostas abaixo:

“Considero vídeos mais importantes porque vem com os conceitos prontos e corretos, já os livros vêm com a possibilidade de abstrair e tirar suas conclusões, porém essas conclusões podem ser erradas” (aluno 17).

“O Vídeo, pois tem uma animação própria e pronta que nos mostra claramente o que temos que entender” (aluno 20).

“O vídeo nos ajuda a interpretar e dar melhor sentido ao entendimento” (aluno 25).

Verificamos nessas respostas, o oposto das primeiras afirmações, ou seja, para alguns alunos as imagens mostradas no vídeo ajudam a clarear o pensamento (aluno 06), sendo que, ao contrário, para alguns outros houve certa confusão, ao dar significado superior ao papel dessas imagens, mostradas nos filmes e animações, como o aluno 17 e 20, ao afirmarem que o vídeo traz conceitos prontos e corretos e que as interpretações dadas pela leitura podem ser erradas, esquecendo-se de que uma interpretação errônea também pode ser obtida em uma mostra de vídeo.

Apesar desses opostos, outro grupo de alunos afirmou, ao responderem a questão 10 do anexo III, que a interação, entre a leitura e as mostras de vídeos, foi a responsável pela melhor compreensão dos conteúdos abordados, como verificado nas respostas abaixo:

“Acredito que **ambos são importantes, que um complementa o outro**, já que **com a literatura você pode imaginar e assim visualizar o modelo em sua cabeça**, mas se isso não for possível em algum momento, o vídeo trará essa mesma visualização para você, ou seja, **o vídeo pode esclarecer coisas que você não entende apenas pela leitura**. Também ajudou a imaginar os experimentos da Física Moderna, trazidos no livro, o que conseqüentemente, me ajudou a entender os conceitos” (aluno 15, grifos meus).

“**Ambos os recursos são de extrema importância**, pois se o aluno não entende o que lê, o vídeo ajuda à compreensão da teoria ou experimento” (aluno 33, grifo meu).

“Visualizar a animação ajuda ainda mais a entender. Ambos são importantes, cada qual no seu modo, vídeo é válido para quem não gosta de leitura, para quem prefere ler o livro é melhor escolha, porém **os dois juntos surtem um efeito muito maior e mais vantajoso para aquele que está aprendendo**” (aluno 04, grifo meu).

Percebemos que a interação metodológica, da apresentação dos conteúdos pelos recursos utilizados, surtiu efeitos positivos e agregadores no aprendizado dos conceitos abordados com os alunos, uma vez que um recurso completou o outro, formando um todo indissociável e complexo de cognição e aprendizado, como bem ressaltou o aluno 04 ao afirmar que: *“os dois juntos surtem um efeito muito maior e mais vantajoso para aquele que está aprendendo”*. Percebe-se aqui uma apreensão do objeto, ou da realidade estudada, como uma interação entre o fenômeno e a essência, como descrita por Kosík (2011).

5ª categoria – A encenação: A literatura como ferramenta no ensino de física.

Nessa penúltima categoria pretendemos verificar se a literatura se concretizou como uma ferramenta didática no ensino dos conceitos de Mecânica Quântica, abordados nas leituras e vídeos, bem como analisar o surgimento dos pseudoconceitos e como esses conceitos se transformaram em conceitos científicos pelos exemplos dados nas respostas (anexo IV) sobre a questão 09 (anexo III).

Dada a complexidade e extensão dessa categoria, as respostas abaixo são apresentadas em subcategorias, cada uma demonstrando os conceitos físicos citados pelos alunos. A primeira parte dessas respostas, portanto, trata de um todo, com vários exemplos conceituais citados, da forma como esses alunos entenderam a literatura como ferramenta no ensino da física, como eles compreenderam o papel da leitura na formação desses conceitos e de que forma essa metodologia facilitou seu aprendizado em física.

As primeiras respostas abaixo destacam o aumento no entendimento e aprendizado dos conceitos físicos sobre MQ apreendidos:

“As leituras me auxiliaram muito no entendimento e aprendizado dos conceitos científicos estudados em sala, de modo que agora, com a leitura dos capítulos do livro Alice no País do Quantum pude ver a explicação de uma forma completamente diferente, que se tornou mais simples e de fácil compreensão, tal como a ideia da superposição de estados quânticos. **A ideia passada pelo livro faz o leitor analisar de uma forma completamente distinta de uma aula com contas e números, ou seja, foi uma ideia brilhante passar esse tipo de atividade para nós**, ainda mais nesta matéria que na maioria das vezes é difícil de entender” (aluno 04, grifos meus).

“A utilização das leituras na sala de aula conseguiu me fornecer um ótimo aprendizado sobre o assunto. Fiquei muito satisfeita com o resultado. No livro Alice no País do Quantum, lendo sozinha e depois com a ajuda do professor e seus comentários foi de grande ajuda” (aluna 46, grifos meus).

Essas respostas atestam a validade da literatura como ferramenta de ensino de física, além de demonstrar a satisfação em se estudar física. Outros alunos salientaram esse aumento no entendimento e aprendizado citando os conceitos físicos sobre MQ aprendidos, como exemplificam as respostas abaixo:

“Sim. Principalmente as ideias de superposição de estados, princípio da incerteza e características dos elétrons” (aluno 05).

“Sim. Ajudaram, principalmente o livro Alice no País do Quantum, que além de me ajudar a entender o que era um **fóton** (pacote de luz, de acordo com o livro), algo que antes da leitura eu não tinha conhecimento, me ajudou a entender mais sobre o **comportamento da luz, que é dual**, por meio da experiência com as fendas, que comprovou essa dualidade, e também o **gato de Schroedinger**, que também foi representado no livro” (aluno 15, grifos meus).

“Com as leituras, facilitou o meu entendimento do conteúdo, como a criação do leitor de supermercado (ver cap. XVIII da Era dos Extremos de Hobsbawn) e os operários, do livro Alice no País do Quantum, que mostravam uma casa sendo construída com base em probabilidades” (aluno 09).

Verificamos nessas respostas o papel da leitura na formação dos conceitos físicos estudados, mostra que uma linguagem mais acessível ao conhecimento científico facilitou a transposição didática de conceitos, como descrito por alguns trabalhos, como Flôr e Cassiani (2011), e Kemper, Zimmermann e Gastal (2010). Outros alunos interpretaram a leitura, e suas analogias, como facilitadoras do entendimento de conceitos físicos, além de associarem, através da leitura, eventos cotidianos com a física, como atestam as respostas a seguir:

“Sim, como por exemplo, o banco de energia para elétrons ajudou a entender o quanto o elétron necessita de energia” (aluno 33).

“Como no livro *Alice no País do Quantum*, ela coloca os elétrons em forma de olhos, guarda chuva para cima e para baixo (para representar os spins), querendo que o leitor imagine de vários jeitos os conceitos estudados” (aluno 07).

“Sim, principalmente o texto de Hobsbawm me fez associar coisas comuns do dia-a-dia com a física, coisa que eu nunca havia pensado” (aluno 41).

Alguns extremos também foram selecionados. Para alguns alunos a motivação ganha pela leitura fez com que superestimassem a metodologia empregada, enquanto outros consideraram a leitura apenas como complemento aos conteúdos ensinados. As respostas a seguir exemplificam esses extremos:

“O próprio livro *Alice no País do Quantum* nos ensina a física moderna” (aluno 25).

“Sim, pois o livro só foi um complemento da matéria explicada” (aluno 43).

O uso da leitura no ensino de física aponta para um aumento da curiosidade e do prazer. A resposta do aluno 25 nos indica que, quando trabalhamos os conceitos físicos com recursos literários, desempenhamos um papel desencadeador de motivação nos alunos, pois sua linguagem é mais acessível, possibilitando um gosto maior por parte dos alunos no estudo da física como apontado por Monteiro et al. (2005).

Contudo, é importante ressaltar que essa supervalorização pode ser responsável por uma interpretação errônea da metodologia utilizada, a qual pode ser responsável pela reificação da analogia. O livro *Alice no País do Quantum* não ensina a Física Moderna como afirma o aluno 25; no máximo, fornece-nos uma base para uma compreensão inicial, o pseudoconceito, que depois de tratado didaticamente pode ser generalizado em outros contextos, promovendo a conversão semiótica (DUVAL, 2005), da leitura para o conceito físico, como indicado pela resposta do aluno 43, ao salientar que a leitura foi um apoio à compreensão conceitual.

Pelas respostas fornecidas nessa categoria, verificamos vários exemplos citados pelos alunos a respeito de elementos de MQ, além do fato de terem associado o seu cotidiano com a física (aluno 41), principalmente ao perceberem a melhoria em seu aprendizado em física, como ressaltado nas respostas dos alunos 07, 09, 15, 33 e 46, pela utilização de palavras como melhor aprendizado, melhor entendimento, ajuda e auxílio, constatando que a literatura permitiu uma compreensão conceitual dos fenômenos físicos estudados. É importante ressaltar a admiração da aluna 46 ao ficar satisfeita com o resultado de seu aprendizado sobre o conteúdo e fenômenos físicos estudados.

A respeito da formação de pseudoconceitos, sobre superposição de estados quânticos as respostas abaixo nos mostram como esses alunos entenderam esse conceito da MQ.

“Ajudaram a criar. Como o caso do gato de Schrodinger. Pude perceber melhor e entender como isso ocorreu” (aluno 09).

“Sim. O livro *Alice no País do Quantum*, na parte em que os pedreiros estão construindo a casa, me ajudou a ver a profundidade e complexidade do princípio da superposição de estados” (aluno 18).

“Sim, por exemplo, quando Alice vê os tijolos sendo jogados na construção desorganizadamente. Essa parte do texto ajuda na melhor compreensão do comportamento de partículas em termos de distribuição de probabilidades” (aluno 36).

“Sim, as leituras de certa forma me ajudaram a organizar as ideias sobre os conceitos e ter um melhor entendimento da física moderna, como por exemplo, a superposição de estados quânticos, em que é mostrado no capítulo 3 do livro” (aluno 42).

Verificamos pelas respostas acima que os alunos citaram vários exemplos do livro *Alice no País do Quantum*, para explicar sua compreensão sobre superposição e distribuição de probabilidades. Note-se que em nenhum momento esses alunos afirmam que a analogia é o conceito. Ao contrário, utilizam-na corretamente como representação, para transmitir seu entendimento do conceito físico citado.

Outros alunos apropriaram-se do conceito de dupla fenda, e da dualidade onda partícula, como exemplificam as respostas abaixo:

“Sim. A explicação dada pelo professor sobre o modelo de dupla fenda foi ainda mais esclarecedora após a leitura do capítulo 3 do livro, onde Alice vê esses acontecimentos através de uma sala de pensamentos” (aluno 10, grifos meus).

“Ela nos ajudou a ter uma vaga ideia, como por exemplo, o da dupla fenda, por mais confuso que seja nos ajudou a ter uma noção, mas só consegui ter uma ideia melhor quando explicado em sala” (aluno 14).

“Sim. Porque ela nos serve de apoio, como no caso da dupla fenda ela nos mostra, nos dá a ideia, nos permite construir um modelo para solucionar problemas” (aluno 12).

“Sim, como o conceito de que a matéria se comporta ou como partícula ou como onda” (alunos 29 e 39).

Ressaltamos nessas primeiras respostas o fato dos alunos terem compreendido que a leitura de *Alice no País do Quantum* foi um apoio metodológico às aulas ministradas, os alunos atestam terem compreendido apenas uma noção do conceito, que foi esclarecido melhor durante as aulas. Tais respostas nos leva a afirmar o surgimento dos pseudoconceitos, conceitos potenciais e pensamento abstrato (VYGOTSKY, 2008) através da leitura, que se transformaram em conceitos físicos após as aulas e explicações sobre os fenômenos quânticos descritos.

Os alunos reconheceram a importância do professor como mediador do conhecimento, realizando o papel entre o aluno e o conteúdo. O aluno 10 cita que a explicação do professor sobre dupla fenda o ajudou a compreender a leitura do capítulo 3 do livro, que trata especialmente de elementos de MQ. O aluno 14 enfatiza corretamente que a leitura ajudou a construir uma ideia inicial, uma noção, que só foi aprofundada quando tratada didaticamente pelo professor em sala de aula. A respeito das respostas dadas pelos alunos 29 e 39, vale lembrar que, de acordo com Pessoa Junior (2003), a essência da física quântica é a dualidade onda-partícula.

Outro exemplo bastante citado refere-se ao princípio da incerteza de Heisenberg, que para muitos alunos foi muito curioso de se conhecer. Vejamos suas respostas sobre esse conceito:

“Sim. Como no caso dos elétrons, **foi mais fácil fixar a ideia de que esses são partículas que necessitam estar em constante movimento para permanecerem estáveis.** Quanto menor sua agitação, maior o espaço que ocupa” (aluno 22, grifo meu).

“Sim, pois com as leituras consegui entender melhor o princípio da incerteza e a teoria da relatividade, assim me ajudando na compreensão da física moderna” (aluno 35).

“**Não somente uma vaga ideia, como uma ampla visão dos fatos estudados.** Como Alice conversando com as personagens (elétrons) e nunca vendo suas faces (princípio da incerteza)” (aluno 45, grifo meu).

Mais uma vez as respostas fornecidas pelos alunos sinalizam a aceitação da metodologia empregada, uma vez que ressaltam ter aprendido mais, descrevem palavras como: mais fácil; consegui entender melhor; ou como ressalta o aluno 45, ao afirmar ter tido, não apenas uma vaga ideia, mas uma ampla visão dos conceitos estudados.

Todas as respostas analisadas nessas cinco categorias nos permite afirmar que esses alunos criaram pseudoconceitos e conceitos potenciais, de acordo com Vygotsky (2008), através da leitura, e que a abstração, como função psíquica superior, deu-se após o devido tratamento didático em sala de aula sobre os elementos físicos de MQ lidos no livro *Alice no País do Quantum* e vistos nas mostras de vídeos. Isso reforça o uso da literatura como uma possível ferramenta no ensino de física.

6ª Categoria: A verificação dos conceitos físicos apreendidos pelos alunos.

No final de nossas leituras e, após as aulas em sala, foi proposto aos alunos, como forma de verificar e consolidar os conteúdos abordados nesse estudo, uma avaliação de múltipla escolha (ver anexo V) na qual os alunos responderam

individualmente a questões conceituais sobre a FMC e MQ, nos diversos aspectos trabalhados em nossa metodologia.

Ressaltamos estarmos cientes da limitação de uma verificação por meio de testes de múltipla escolha. No entanto, foi feito o possível para se averiguar a apreensão dos conceitos físicos, dada as circunstâncias limítrofes impostas pela própria instituição escolar que determina a execução de simulados como forma de avaliar seus alunos. Além disso, o próprio tempo escasso ao final do último bimestre do ano letivo, com alunos preocupados, também, com o encerramento das aulas, férias e exames vestibulares, deve ser considerado. E, mesmo apesar dessa limitação, podem-se estabelecer alguns indicativos de que os alunos converteram (DUVAL, 2005) as leituras em conceitos físicos apropriados ao acertarem as questões propostas.

Algumas dessas questões foram elaboradas e baseadas em exames de vestibular, visando mostrar aos alunos que a FMC também é cobrada nesses concursos, enquanto a maioria dos exercícios foi elaborada sobre os conteúdos abordados na leitura do livro *Alice no País do Quantum*, e sobre as discussões em sala de aula. Ressalta-se que as questões de número 01 a 05 não tratam dos conteúdos abordados nessa dissertação, pois são relativas aos estudos realizados com os alunos anteriormente como cumprimento do cronograma de conteúdos da escola, abordando tão somente questões sobre a relatividade restrita. Já as questões de número 06 a 17 são exclusivas dos conteúdos sobre FMC e MQ tratadas em nosso estudo, e são elas que consideramos nessa análise de dados.

Assim sendo, a fim de verificarmos como os alunos puderam compreender os conceitos físicos estudados pelas leituras e mostras de vídeos, vamos analisar as questões do anexo V, propondo uma análise de forma a concentrar os conceitos

trabalhados e identificar como esses alunos conseguiram transpor a abstração literária em abstração dos conceitos físicos sobre FMC e MQ.

A questão 06 foi extraída do exame vestibular da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e visa identificar aspectos sobre a radiação eletromagnética, em especial sobre o caráter dual de sua natureza. O item *B*, como resposta ao exercício, foi identificado pelos alunos como a alternativa correta, tendo apresentado o caráter ondulatório e corpuscular devido ao experimento realizado, além de terem compreendido que um fóton não tem massa de repouso e que sua velocidade é c .

Lembramos que os alunos tiveram acesso ao experimento da dupla fenda através das leituras, apresentações, mostras de vídeos e aulas expositivas, o que permitiu que convertessem essas representações semióticas (DUVAL, 2005) em outras e acertassem a questão. Além disso, os alunos haviam captado a essência da FQ como sendo a dualidade onda-partícula, como já citada por Pessoa Junior (2003):

Em poucas palavras, o que caracteriza a Teoria Quântica de maneira essencial é que ela é a teoria que **atribui, para qualquer partícula individual, aspectos ondulatórios, e para qualquer forma de radiação, aspectos corpusculares**. Esta é uma versão “geral” da dualidade onda-partícula (p. 1, grifo do autor).

A questão 07 consta no exame vestibular da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e trata de vários conceitos sobre FMC, constituindo-se em uma questão de verdadeiro ou falso, com exigência de resposta como soma das alternativas corretas. Constatamos que os alunos identificaram os conceitos sobre corpo negro ideal, efeito fotoelétrico, teoria da relatividade restrita, quantização da energia e dualidade onda partícula. A apresentação da soma das alternativas corretas como $1+4+16 = 21$, mostra-nos que os alunos compreenderam e identificaram os conceitos corretos,

conseguindo, inclusive, eliminar as alternativas falsas, o que nos indica a apreensão dos conteúdos trabalhados em nossa metodologia.

A questão 08 trata das “duas nuvens de Kelvin”, texto constante na maioria de livros didáticos e introdutórios ao estudo da FM. Essa questão foi elaborada tendo em vista os aspectos históricos trabalhados com os alunos em sala de aula. Nossos alunos identificaram a alternativa *B* como a correta, mostrando conhecerem o aspecto histórico e inicial dos estudos que levaram ao surgimento da Física Moderna a partir dos problemas não resolvidos, sobre a questão do éter e da radiação do corpo negro. Vale lembrar que de acordo com Pessoa Júnior (1996) o uso da história da ciência, da filosofia e da literatura, no ensino de física, possui um papel importante e torna o curso mais interessante.

A questão 09 visa buscar nos alunos a compreensão a respeito da natureza da luz, dentro de um contexto histórico e experimental, onde inicialmente a luz era considerada um corpúsculo por Newton e como uma onda por Huygens. Seu caráter ondulatório foi comprovado por Young, quase 1 século depois de Newton, no experimento da dupla fenda e como corpúsculo, no efeito fotoelétrico de Einstein, depois de 1 século da comprovação de Young, levando à dualidade da luz.

A escolha da alternativa *E* pelos alunos demonstra que eles compreenderam bem o caráter ondulatório e corpuscular da luz, como dependente do experimento realizado e inserido em um processo histórico que levou séculos entre uma comprovação e outra. Isso torna válido lembrar a citação de Zanetic (2006) sobre qual história utilizar no ensino de física: *“Que história da física utilizaria? Opto por uma história que contemple tanto a evolução conceitual e metodológica da física quanto sua relação com*

outras áreas do conhecimento e com a sociedade de uma maneira geral, enfim a física inserida no processo histórico” (p. 43).

A questão 10 do vestibular da Universidade Federal do Paraná (UFPR) foi elaborada de forma a serem preenchidas as lacunas em um texto com os conceitos corretos a respeito do surgimento da Física Moderna, da dualidade partícula-onda e dos respectivos experimentos, a fim de constatar o caráter ondulatório e corpuscular do elétron e da luz.

A escolha do item *C* pelos alunos demonstra seu entendimento sobre esses conceitos e aspectos históricos e experimentais necessários à compreensão do caráter ondulatórios e corpusculares dos elétrons e dos fótons. Note-se que essa questão complementa a questão 09, ou seja, insere-se em um mesmo processo histórico, no qual o papel do experimento determina o caráter corpuscular ou ondulatório da matéria, visando ressaltar o entendimento desses alunos sobre a essência da Física Quântica (PESSOA JUNIOR, 2003).

A questão 11, pertencente ao exame vestibular da Universidade Estadual de Goiânia (UEG), trata de uma tirinha, uma charge onde um fóton e um elétron procuram um analista a fim de buscarem identificar sua natureza, se onda ou partícula, ao que o analista questiona sobre por que não ser uma partícula-onda. Nessa questão, além de sua parte cômica, o aluno deve identificar o que o fóton deve ser capaz de fazer para validar a proposta do analista, ou seja, para ser uma onda-partícula o fóton deve ser capaz de sofrer difração e efeito fotoelétrico, o que corresponde a alternativa *C*, escolhida pelos alunos, identificando seu entendimento sobre o conceito dual das partículas.

É importante comentar que a escolha dessa questão, além de buscar reforçar o entendimento da essência da Física Quântica, como já citado por Pessoa Junior (2003),

como sendo a dualidade onda-partícula, também reforça o uso de alegorias, analogias e metáforas, no ensino de física. O uso de análogos no ensino de física aponta para melhor aproveitamento dos estudos, como pode ser verificado, por exemplo, em Zambon e Terrazan (2013).

Sobre a questão 12, buscamos inserir o caráter histórico da hipótese de De Broglie, que em sua tese de doutorado considerou, pelo princípio da simetria da natureza, que a matéria apresenta caráter dual, propondo que elétrons, de natureza corpuscular, seriam capazes de sofrer difração e, a escolha da alternativa *B* pelos alunos sugere seu entendimento sobre o caráter histórico e conceitual sobre o surgimento da hipótese formulado por De Broglie, além de mostrarem ter compreendido o princípio da simetria da natureza e da dualidade da matéria. Com essa questão os alunos puderam, além do seu caráter conceitual, tomar conhecimento de outras dimensões (SNOW, 1995) que a ciência possui, podendo promover seu entendimento sobre a história da dualidade da matéria.

A questão 13 resgata o texto lido, anexo II, sobre o caráter histórico, filosófico, social, político e de guerra, a respeito do capítulo XVIII da Era dos Extremos, buscando nesse texto a compreensão do princípio da incerteza de Heisenberg, como um dos conflitos pelos quais os cientistas do começo do século XX passaram ao perceberem o desaparecimento de certezas clássicas, tais como a velocidade e a posição. A escolha da alternativa *A* pelos alunos demonstra que compreenderam os aspectos histórico e conceitual, o que nos mostra que puderam abstrair da leitura o conceito físico estudado, reconstruindo o símbolo, ou signo, semiótico da leitura em símbolo conceitual (DUVAL, 1993).

A questão 14 busca resgatar o aspecto histórico do surgimento da teoria quântica com Niels Bohr e Werner Heisenberg, bem como demonstrar o assombro sobre as estranhezas da Mecânica Quântica percebidas pelos físicos da época. Sobre a principal estranheza os alunos apontaram a superposição de estados quânticos de uma partícula, marcando corretamente a alternativa *D* como resposta e indicando terem compreendido os aspectos relativos ao surgimento da teoria quântica e como se mostrou estranha, inclusive, aos cientistas da época. Lembramos que no prefácio de *Alíce no País do Quantum* também é relatada a percepção de Bohr sobre as estranhezas da FQ, além do texto de Hobsbawm explorar o assunto em diversos contextos.

A questão 15, por sua vez, trata da teoria quântica como precisa para descrever o comportamento de partículas em termos de distribuições de probabilidades. Os alunos identificaram a alternativa *C* como explicação ao significado de distribuição de probabilidades. A figura ilustrativa, constante na questão, trouxe significado à interpretação dos alunos, ajudando-os a relembrar a leitura de *Alice no País do Quantum*, no qual a personagem tem uma explicação sobre distribuição de probabilidades (GILMORE, 1998, p. 19-20). Vale recordar que a explicação sobre distribuição de probabilidades aos alunos passou, também, pelo aproveitamento do recurso do simulador Java sobre tunelamento quântico, disponível e distribuído pelo Phet Colorado, possibilitando, inclusive, justificar a analogia descrita na questão 15.

Já a questão 16 trata especificamente do colapso da função de onda e do papel do observador ao interferir no experimento. Ao identificarem a alternativa *A* como correta os alunos compreenderam que um observador interfere no experimento pelo simples fato de observá-lo, gerando o colapso da função de onda, o que no exercício se refere ao fato dos elétrons difratando por duplas fendas, ao serem observados, faz com

que o padrão de interferência desapareça e atrás das fendas surja apenas duas riscas verticais, que indicam o caráter corpuscular dos elétrons.

É importante comentarmos que o vídeo sobre o *Dr. Quantum* (ver figura 7), representando o experimento da dupla fenda, e da difração do elétron, além da visão idealista mostrada no filme *Quem Somos Nós?* (ver figura 8), colaborou bastante para que os alunos compreendessem melhor os conceitos quânticos sobre o colapso de função de onda, dada pelo papel do observador e suas interferências nos experimentos.

Por fim, a questão 17 resgata o experimento mental do gato de Schrödinger, seu contexto conceitual e a questão à qual esse experimento se refere, ou seja, qual o estado do gato antes da caixa ser aberta? A escolha da alternativa *B* pelos alunos aponta para sua compreensão a respeito da correta explicação sobre superposição de estados quânticos, que indica tão somente a possibilidade de uma partícula estar em dois ou mais estados quânticos ao mesmo tempo.

O conceito sobre superposição de estados quânticos, além de ter sido explorado pela leitura em Gilmore (1998, p.54) e pelos simuladores do Phet Colorado, foi tratado nas mostras dos filmes *Quem Somos Nós*, *Um Homem Sério* e no seriado *The Big Bang Theory*, trazendo diversas interpretações para os alunos que possibilitassem uma apropriação conceitual dos conteúdos estudados.

A tabela abaixo resume os conceitos abordados nesse grupo de questões e exemplifica os conteúdos sobre FMC e MQ trabalhados com os alunos ao longo das aulas por meio das leituras e das mostras de vídeos utilizadas.

CONCEITO ABORDADO	QUESTÕES
Dualidade onda-partícula.	06, 10, 11 e 12.
Tópicos históricos e introdutórios à FMC	07, 08, 09, 10, 12, 14 e 17.
O papel dos experimentos para determinação do caráter ondulatório ou corpuscular da luz e da matéria.	09, 10 e 16.
Hipótese de Broglie e a natureza dual da matéria.	12
Princípio da Incerteza de Heisenberg.	13
Teoria Quântica.	14
Colapso da função de onda e papel do observador.	16
Superposição de Estados Quânticos.	17

Tabela 1: Conceitos de FMC e MQ presentes na avaliação.

Considerando que esses alunos não tiveram outro contato com os conteúdos de FMC e MQ, a não ser pela leitura dos três capítulos de *Alice no País do Quantum* (anexo I), da leitura do capítulo XVIII de Hobsbawm (anexo II), e das mostras de vídeos apresentadas, além das aulas com discussões e explicações complementares, podemos considerar que a literatura é uma ferramenta relevante para o ensino de física. E, por meio da leitura, os alunos puderam criar pseudoconceitos, os quais tratados didaticamente pela mediação dada pelo professor foram transformados em conceitos físicos a respeito dos elementos de FMC e MQ estudados com esses alunos. Isso é reforçado pelos testes de múltipla escolha, pois se os alunos acertaram esses testes é porque compreenderam os conceitos corretos.

Os alunos responderam bem às questões conceituais propostas na avaliação, e não apresentaram dúvidas durante sua execução. Mesmo os alunos de inclusão (aluno 20, 25 e 40), que tinham laudos psicológicos apontando para problemas cognitivos, demonstraram maior entendimento e prazer nessa abordagem, quando comparada à metodologia tradicional que tinham tido em seu ensino de física até aquele ano.

É importante relatar que assumimos a limitação do teste como comprovação de apreensão conceitual, contudo, a aplicação do simulado, apesar de ser exigência da instituição escolar como instrumento de prova, forneceu-nos bons indicativos de validação da literatura como ferramenta de ensino de física. Foi feito o possível dentro do prazo, uma vez que ao final do 4º bimestre, às portas das férias escolares e dos exames vestibulares, certo ambiente de encerramento se instaura em qualquer escola, o que torna difícil ao professor tentar prolongar quaisquer instrumentos de avaliação extras, até mesmo porque vários alunos deixavam de ir à escola depois das provas finais. Apesar dessas limitações pudemos desenvolver um laço mais estreito com esses alunos, no que diz respeito aos conteúdos de física, percebemos ao final que o ensino de física passado para esses alunos deixou de ser frio e impessoal, e que eles estavam contentes em ter aprendido alguns conceitos de FMC e MQ.

Assim sendo, verifica-se que as respostas dadas pelos alunos (anexo IV) e a realização da prova (anexo V), indicam a relevância de nossa abordagem. É possível articular a literatura como uma ferramenta didática no ensino de física, desde que o professor assuma seu papel de mediador do ensino e respeite seus alunos como partícipes e protagonistas de seu aprendizado. Esse papel de mediador, aliás, deve ser permanente nesse tipo de abordagem.

A literatura abordada proporcionou aos alunos trabalhar com sua língua materna, permitindo criar uma percepção maior sobre os conceitos físicos por meio das palavras, cujo significado, segundo Vygotsky (2008), é uma generalização, um conceito e um ato restrito ao pensamento, que se transformou em conceitos físicos para esses alunos, além de ter proporcionado um prazer maior ao estudarem a física.

Ao dar significado aos conceitos físicos, as palavras deixaram de ser ocas e vazias, passando a constituir uma ponte entre os conceitos potenciais e à abstração necessária para a generalização, que proporcionou a compreensão dos conceitos físicos tratados.

As representações semióticas de Duval (1993) e a conversão (idem, 2005), estabeleceram-se no estudo realizado. A palavra por meio da leitura se configura como uma representação semiótica que foi utilizada com o intuito de promover a conversão para um pensamento mais abstrato, no caso, os conceitos sobre FMC e MQ estudados com os nossos alunos. A transformação de signos matemáticos, da linguagem matemática e da linguagem física, em signos descritos por palavras pertencentes à língua materna dos alunos, além de signos proporcionados pelas analogias, permitiu melhor compreensão e transformação de um sistema semiótico em outro mais abstrato.

Observou-se, também, que os alunos puderam agora transitar entre a ponte construída, verificando os conceitos tanto pela escrita, quanto pelas expressões matemáticas, só que agora com um maior significado, ou seja, compreenderam melhor o significado das expressões matemáticas usadas na física, como o caso citado anteriormente sobre a equação de onda de De Broglie.

Os resultados descritos em suas respostas mostram que os alunos, também, compreenderam bem o papel e uso das analogias no ensino de física, não confundiram o análogo com o conceito e estabeleceram uma importante ligação conceitual sobre seu uso como facilitador de sua aprendizagem. A imaginação e a construção de modelos usados na ciência foram bem compreendidas como ferramentas de pensamento para o desenvolvimento de conceitos mais abstratos.

A utilização inicial do texto de Hobsbawm (1995) possibilitou uma inserção na história, filosofia e sociologia da física, permitindo aos alunos compreenderem melhor o papel da FMC na sociedade atual em diversos contextos culturais, mostrando a física em seu contexto cultural mais amplo.

A dificuldade de leitura apresentada por alguns alunos mostrou-se como um obstáculo ao uso dessa ferramenta de ensino. Porém, suas dificuldades matemáticas eram imensamente maiores que as leitoras, assim, mesmo para esses, pode-se dizer que houve ganhos didáticos, pois acharam curiosas e interessantes as narrativas descritas, além do que os vídeos e filmes apresentados acabaram por se somar ao seu aprendizado, constituindo uma interação entre as formas didáticas trabalhadas.

8. EPÍLOGO

É importante salientar que o início desse trabalho se deu entre o não possível e o possível, na minha práxis como professor. Ou seja, na minha tentativa de abordagem direta no ensino - não só da MQ, mas da física para alunos de EM - nos deparamos com uma impossibilidade. Esta dissertação não consiste em dizer que encontramos a solução definitiva para a inserção da FQ no EM, mas consiste em dizer que encontramos um caminho possível, caminho esse, aparentemente, menos árduo, inclusive, para os alunos, uma vez que se constituiu em um caminho em que os elementos humanos são considerados, pelo fato de termos transformado a apatia em simpatia pelo estudo da física.

Pela análise dos dados pode-se verificar que foi possível promover uma metodologia de ensino por meio da leitura, permitindo emergir os conceitos físicos. A leitura permitiu que os alunos superassem, significativamente, suas dificuldades na compreensão dos conceitos físicos. Houve o desenvolvimento de uma aprendizagem

problematizadora, dialógica e horizontal, como descrito por Freire (1971; 1975), o que garantiu a satisfação em se estudar a física, além de um interesse maior sobre a mesma. A leitura proporcionou o surgimento de pseudoconceitos e conceitos potenciais, como descritos por Vygotsky (2008), que se transformaram em conceitos físicos apropriados sobre FMC e MQ, através da interação efetuada entre as diversas formas de aprendizado oferecidas aos alunos. Claro que estamos tomando por base a forma como tais conceitos são apresentados nos materiais didáticos e paradidáticos. A leitura oferecida mostrou que a literatura se constitui como nova ferramenta de ensino, possibilitando observar como os alunos abstraem as palavras e conceitos apresentados em formas analógicas que se transformaram nos conceitos físicos estudados.

Entendemos que o processo de ensino e aprendizagem é complexo, reside, muitas vezes, no fato do professor querer apresentar uma inovação curricular e metodológica, e outras no fato do aluno querer aprender efetivamente. O papel mediador do professor é fundamental em qualquer proposta de ensino. Entretanto, as dificuldades à inserção de qualquer novidade, seja ela curricular ou metodológica, são imensas. É muito mais fácil apenas reproduzir o material didático oferecido pela escola, que se resume, atualmente, em apostilamentos com não mais de 40 páginas, em média, de conteúdos, acompanhados de exercícios desarticulados em todos os sentidos. Não se leva em conta a dificuldade dos alunos, muito menos seus conceitos anteriores. Transfere-se para os alunos a responsabilidade por não saberem responder aqueles exercícios de vestibular.

Essas dificuldades se somam à falta de material didático contextualizado, que apresente uma física articulada com outras formas culturais, principalmente com a literatura, com a história, com a filosofia ou a sociologia. O maior problema é que tal acervo, como denunciado por Pessoa Junior (1996), ainda não existe. A física existente

é uma física “algoritmizada” que não se traduz nos anseios e vontade dos jovens estudantes, como destacado por Fourez (2003). Os jovens parecem querer uma física que responda aos seus questionamentos, não uma física imposta pela comunidade científica, ou pelos livros-textos.

O contexto inovador de nosso trabalho se constata em dois eixos, tanto como inovação curricular, quanto metodológica. A articulação entre física e literatura, como ferramenta de ensino de conceitos físicos mais abstratos, constitui uma inovação metodológica. A inovação curricular se verifica na introdução de conceitos de Mecânica Quântica no EM. A bibliografia estudada mostra a escassez de estudos a respeito da introdução da MQ no EM.

Em nosso primeiro capítulo, analisamos os estudos que tratassem de características históricas e filosóficas; sobre literatura, leitura e divulgação científica, no ensino de física. Verificamos haver um consenso por parte da literatura científica a esse respeito, sobre as vantagens dessa relação, mas há poucos trabalhos que articulam esses enfoques. Esperamos ter mostrado em nosso trabalho que há uma articulação entre física e literatura, que pode levar à construção de conceitos físicos por meio da leitura. Isso aponta para a necessidade de novos estudos teóricos que articulem o uso da literatura com outros enfoques, em um contexto inovador, introduzindo elementos em sala de aula, atualmente, inexistentes, ou incipientes, como a história e a filosofia da física.

Nossa escolha por uma pesquisa qualitativa de cunho dialético, baseada em uma pesquisa-ação, possibilitou a inserção do professor no contexto cultural dos alunos. Em geral, o professor ao se deparar com uma turma totalmente apática ao ensino e desinteressada pelos conteúdos curriculares, simplesmente os abandona, no sentido de

seguir as “regras do jogo escolar”. Nesse caso, apenas cumprem seu papel burocrático de seguir os conteúdos do livro-texto ou a apostila de física e aplicando trabalhos e provas aos alunos, que por sua vez, entram nesse mesmo jogo e cumprem seu papel para serem aprovados. Triste é o ensino que nisso se baseia, pois é morto de significados, seguindo apenas o estipulado/imposto e não almejando algo melhor.

No entanto, quando o professor age como etnógrafo, torna-se possível entender melhor a cultura dos seus alunos, observa-os e verifica como agem uns com os outros e com o seu meio social. Tal verificação, no nosso caso, possibilitou compreender que as suas relações sociais, escolares e de estudo parecem ser regradas pela pseudoconcreticidade, como indicada por Kosík (2011), em que vivem imersos na alienação proporcionada pela indústria cultural, como definida por Adorno e Horkheimer (1985). Quando o professor passa a “ver” essa alienação, inclusive a sua, e compreendê-la, ele pode agir de forma a convertê-la em seu objeto de ensino, de forma que os alunos sintam-se mais a vontade, do que bruscamente tentar retirá-los de seu mundo, por vezes, alienado e construído historicamente e socialmente, para inseri-los em uma linguagem técnica, científica, da qual não sentem necessidade de apropriação.

A literatura como ferramenta de ensino de física, estabeleceu-se no referencial de Vygotsky (2008) satisfatoriamente bem, uma vez que a peça central de sua teoria se constitui no significado da palavra, que é um conceito. Portanto, as palavras presentes na literatura utilizada formaram pseudoconceitos, que foram generalizados e constituíram as abstrações científicas necessárias à compreensão dos conceitos, sobre Mecânica Quântica, analisados. No mesmo sentido, verificou-se que a teoria de Duval (2005), sobre a conversão de estruturas semióticas, também nos ajudou, uma vez que os alunos converteram a leitura materna em outra estrutura semiótica: os conceitos abstratos de FMC e MQ. Isso fortaleceu a pertinência do uso da literatura como

ferramenta de ensino de física, mais próxima e fácil aos alunos que as linguagens científicas ou matemáticas, que não fazem parte de seu mundo fetichizado, ou, se preferirmos, sócio-cultural.

Talvez, o nosso maior erro no ensino de física de EM, seja querer “forçar” a compreensão de uma linguagem matemática pelos alunos, sendo que eles nunca foram preparados para lidar com ela. Em todos os anos anteriores ao EM, os alunos simplesmente seguem um ensino pragmático, onde executam o calcule, o resolva, mas não são apresentados à linguagem, seja ela matemática ou física. Khlyabich (1967, p.12) alertava sobre esse perigo ao lembrar que os matemáticos “*se esqueceram de que as fórmulas matemáticas expressam processos e fenômenos reais do mundo material*”.

Não devemos, portanto, ensinar nossos alunos de forma a apresentar-lhes um mundo “irreal” para eles, feito de abstrações que fogem das suas fetichizações, ao menos não de forma direta, abrupta, pois isso certamente abre espaço para os conflitos e desinteresses sobre a disciplina. Em nosso estudo, ficou claro que uma forma de amenizar a introdução de elementos mais abstratos pode-se dar pelo uso da literatura, língua materna, além de recursos como as analogias e metáforas, que permitem uma inserção aos conceitos mais abstratos da física de forma prazerosa aos alunos.

Dessa forma, o uso da literatura como ferramenta no ensino da física acaba por permitir ao aluno a formação de conceitos mais abstratos, isto é, permite se aproximar da abstração, o que lhe assegura entender a linguagem científica e matemática, posteriormente, compreendendo-a e dando a ela um significado, inexistente, inclusive, anteriormente à aplicação dessa ferramenta de ensino. Como em nosso exemplo, ao utilizarmos a equação de onda de De Broglie, os alunos compreenderam naquele momento o que estavam calculando, pois a literatura havia criado um significado àquela

expressão vazia de significados, mas que após lerem as aventuras de *Alice no País do Quantum*, tiveram sentido. Os alunos se interessaram em saber por que os elétrons difratavam, ou porque partículas tunelavam, assim a linguagem matemática e o conceito físico mais abstrato se estabeleceram como possíveis respostas às suas dúvidas, o que poderia não ter se verificado se tivéssemos iniciado nosso estudo diretamente com a fórmula matemática.

Esperamos ter proporcionado um ensino de física, no qual após anos de estudo o aluno finalmente tenha aprendido a abstrair, um ensino mais humano, mais atraente ao jovem, que busque se aproximar de sua fetichização, ou linguagem, ou interpretação de mundo, respeitando-o como protagonista de seu ensino e aprendizagem, valorizando seu conhecimento e sua forma de se expressar, ao invés de impormos nossa vontade, ou a vontade dos vestibulares a qualquer custo.

Por fim, o que parece ser o fim da jornada, de fato, é apenas o início. Se for verdade que ao andar se faz o caminho, então a jornada apenas começou.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, M. C. B. *O discreto charme das partículas elementares*. Editora UNESP. São Paulo, 2007, 340 p.

ABDALLA, M. C. B. Sobre o discreto charme das partículas elementares. *Revista Física na Escola*, v. 6, n.1, 2005.

ADORNO, T.W.; HORKHEIMER, M.. *Dialética do Esclarecimento*. Editora Jorge Zahar. Rio de Janeiro, 1985, 224 p.

ALEXANDER, P.A; KULIKOWICH, J.M. Learning from physics text: A synthesis of recent research. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 31, n. 9, p. 895-911, 1994.

ALMEIDA, M. J. P. *Discursos da Ciência e da Escola: Ideologia e Leituras Possíveis*. 1. ed. Campinas. São Paulo: Mercado de Letras, v. 1, 120 p., 2004.

ALMEIDA, M. J. P. M.; SILVA, H. C.; MACHADO, J. L. M. Condições de produção no funcionamento da leitura na educação em física. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 1, n. 1 - Janeiro/Abril, pp 5-18, 2001.

ANDRADE, C.D. *Reunião – 10 livros de poesia*. Rio de Janeiro: José Olympio, 1969.

ANDRADE, I. B.; MARTINS, I. Discursos de professores de ciências sobre leitura. *Revista Investigações em Ensino de Ciências*, v. 11, n. 2, pp. 121-151, 2006.

BACHELARD, G. *A formação do Espírito Científico*. Trad. Estela dos Santos Abreu. Editora Contraponto. Rio de Janeiro, 1996. 316 p.

BAKER, Dale R. A summary of research in science education – 1989: Textbooks and text comprehension. *Science Education*, 75 n.3, p. 359-367, 1991.

BAKER, L.; SAUL, W. Considering science and language arts connections: A study of teacher cognition. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 31, n. 9, p. 1023-1037, 1994.

BARBIER, R. *Pesquisa-ação na instituição educativa*. Rio de Janeiro. Editora Zahar, 1985.

BARBOSA-LIMA, M. C.; CARVALHO, A. M. P. Linguagem e o ensino de física na escola fundamental. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v.20, n.1: 86-97, abr. 2003.

BARCELLOS, M. E. Inserindo a física moderna no ensino médio através da leitura: uma abordagem quântica da condução elétrica em cristais de cobre. In: Atas do XVI SNEF (Simpósio Nacional de Ensino de Física), 2005, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBF (Sociedade Brasileira de Física), CEFET, 2005.

BARJA, P. R.; REDÍGOLO, M. L. Homem-Aranha e o Ensino de Física. In: Atas do XVI SNEF (Simpósio Nacional de Ensino de Física), 2005, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBF (Sociedade Brasileira de Física), CEFET, 2005.

BOGDAN, R; BIKLEN, S. K. *Qualitative Research for Education*. Boston. Allyn and Bacon, Inc. 1982.

BOZELLI, F. C.; NARDI, R. Interações discursivas e o uso de analogias no ensino de física. *Revista Investigações em Ensino de Ciências*, v. 17, n. 1, pp. 81-107, 2012.

BOZELLI, F. C.; NARDI, R. O uso de analogias e metáforas em aulas de física no ensino superior: algumas considerações. . In: Atas do V ENPEC (Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências), n. 5, 2005. Bauru. *Anais...* São Paulo: ABRAPEC - Associação Brasileira de Pesquisa em Ciências, 2005.

BOZELLI, F., NARDI, R.. O uso de analogias no ensino de física em nível universitário: interpretações sobre os discursos do professor e dos alunos. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 6, n.3, 2006.

BOZELLI, F.C. Analogias e Metáforas no Ensino de Física: O Discurso do Professor e o Discurso do Aluno. *Dissertação de Mestrado* em Educação para a Ciência, Faculdade de Ciências, Bauru, 2005.

BRAGA, E. S. História da Pedagogia. *Revista Educação*. Editora Segmento. São Paulo, 2010.

BRASIL. *Parâmetros curriculares nacionais. Física*. Brasília: MEC, 1998. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>.

BRICCIA, V.; CARVALHO, A. M. P. Visões sobre a natureza da ciência construídas a partir do uso de um texto histórico na escola média. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 10, nº 1, p. 1-22, 2011.

BROCKINGTON, G.. A Realidade Escondida: a dualidade onda-partícula para alunos do Ensino Médio. *Dissertação de Mestrado*. São Paulo: curso de pós-graduação em ensino de ciências – USP, 2005.

BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. Serão as Regras da Transposição Didática Aplicáveis aos Conceitos de Física Moderna? *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 10, n.3, pp. 387-404, 2005.

BROCKINGTON, G; PIETROCOLA, M. O ensino de física moderna necessita ser real? In: Atas do XVI SNEF (Simpósio Nacional de Ensino de Física), 2005, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBF (Sociedade Brasileira de Física), CEFET, 2005.

BROWN, D. E. Refocusing core intuitions: A concretizing role for analogy in conceptual change. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 30, n.10, p. 1273-1290, 1993.

BUNGE, M.. *Dicionário de filosofia*. Tradução de Gita Guinsburg. São Paulo. Editora Perspectiva, 2002.

CARVALHO, S. H. M.; ZANETIC, J. Ciência e arte, razão e imaginação: um projeto de ensino de física moderna para alunos do ensino médio. In: Atas do XVI SNEF (Simpósio Nacional de Ensino de Física), 2005, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBF (Sociedade Brasileira de Física), CEFET, 2005.

CARVALHO, S. H. M.; ZANETIC, J. Ciência e arte, razão e imaginação: complementos necessários à compreensão da física moderna. In: Atas do IX EPEF (Encontro de Pesquisa em Ensino de Física), 2004, Jaboticatubas. *Anais...* Minas Gerais: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 2004.

CARVALHO, S. H. M.; ZANETIC, J. Ciência e arte, razão e imaginação: um projeto de ensino de física moderna para alunos do ensino médio. In: Atas do XVI SNEF (Simpósio Nacional de Ensino de Física), 2005, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBF (Sociedade Brasileira de Física), CEFET, 2005.

CARVALHO, S. H. M.; ZANETIC, J. Ciência e arte, razão e imaginação: complementos necessários à compreensão da física moderna. In: Atas do IX EPEF (Encontro de Pesquisa em Ensino de Física), 2004, Jaboticatubas. *Anais...* Minas Gerais: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 2004.

CARVALHO, S. H. M.; ZANETIC, J.. Ciência e arte, razão e imaginação: complementos necessários à compreensão da física moderna. *Atas do IX EPEF*. Jaboticatubas. Minas Gerais. 2004.

CHAVES, T. V.; MEZZOMO, J.; TERRAZAN E. A. Avaliando práticas didáticas de utilização de textos de divulgação científica como recurso didático em aulas de física no ensino médio. In: Atas do III ENPEC (Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências), 2001, Atibaia. *Anais...* São Paulo: ABRAPEC - Associação Brasileira de Pesquisa em Ciências, 2001.

CHRISTIANSON, G. E. Kepler's *Somnium*: Science Fiction and the Renaissance Scientist. *Science Fiction Studies*, v 3, 1976. Disponível em: <http://www.depauw.edu/sfs/backissues/8/christianson8art.htm>. Acessado em 20 de março de 2013.

CLEMENTE, J. Using bridging analogies and anchoring intuitions to deal with students' preconceptions in physics. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 30, n.10, p. 1241-1257, 1993.

COUTINHO, A. *Notas de teoria literária*. 2. ed. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1978.

CUNHA, M.. Analogias nos livros de ciências para as séries iniciais do ensino fundamental. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 6, n.2, 2006.

CUSTÓDIO FILHO, J.F.; OLIVEIRA, M. P.. Princípios físicos e a construção de modelos. In: Atas do VII EPEF (Encontro de Pesquisa em Ensino de Física), 2000, Florianópolis. *Anais...* Santa Catarina: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 2000.

CUSTÓDIO PINTO, A. ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino médio? *Cad.Cat. Ens.Fís.*, v. 16, n. 1: p. 7-34, abr. 1999.

CUSTÓDIO PINTO, A.; ZANETIC, J. Contribuições das filosofias da ciência para uma reflexão sobre as (re)concepções do ensino de física. In: Atas do VII EPEF (Encontro de Pesquisa em Ensino de Física), 2000, Florianópolis. *Anais...* Santa Catarina: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 2000.

D'AGOSTIN, A.; LEITE, A. E.; HIGA, I.; PAIVA, L. P. Os estudantes do ensino médio e sua relação com a física. *Anais da 58ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC)*. Florianópolis, SC - julho, 2006.

DAMM, R. F. *Registros de Representação*. In Machado, S. D. A. et al. Educação Matemática: uma introdução. 2ª edição. São Paulo: EDUC, 2000, p. 135-153.

DOLL JR., W. E. *Currículo: uma perspectiva pós moderna*. Porto Alegre: Artes Médicas, 1997.

DUARTE, M. C. Analogias na educação em ciências contributos e desafios. *Revista Investigações em Ensino de Ciências*, v. 10, n. 1, pp. 7-29, 2005.

DUHEM, P. [1903]. *L'Évolution de la Mécanique*. Paris: Vrin, 1992.

DUVAL, R. Registros de representações semióticas e o funcionamento cognitivo da compreensão em matemática. In: MACHADO, S. D. A. (org) *Aprendizagem em matemática: registros de representações semióticas*. 2. ed. São Paulo: Papirus, 2005.

DUVAL, R. *Registres de représentations sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée*. Annales de Didactique et Sciences Cognitives. ULP, IREM Strasbourg 5, 1993.

DUVAL, R. *Sémiosis et pensée humaine: registres sémiotiques et apprentissages intellectuels*. Suisse: Peter Lang, 1995.

EINSTEIN, A. *A Teoria da Relatividade Especial e Geral*. Editora Contraponto, São Paulo, 1999, 132 p.

EZPELETA, J. *Notas sobre investigación participante y construcción teórica*. Brasília, DF, INEP. Seminário de Pesquisa Participativa. 1984, 28 p. (mimeo). P. 7-16.

FELLOWS, N. J. A window into thinking: Using student writing to understand conceptual change in science learning. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 31, n. 9, p. 985-1001, 1994.

FERRAZ, A. S. D.; DUARTE, J. S.; CUNHA, F. M.; BERTOLLI FILHO, C.; ARRUDA, M. S. P. Leitura e compreensão de textos nos livros didáticos de ciências: um problema no significado das palavras. In: Atas do III ENPEC (Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências), 2001, Atibaia. *Anais...* São Paulo: ABRAPEC - Associação Brasileira de Pesquisa em Ciências, 2001.

FERREIRA, A.A.. Ensino de Física das Radiações na Modalidade EJA: Uma Proposta. *Dissertação de Mestrado*. São Paulo: IF/FE USP, 2004.

FIEDLER-FERRARA, N. O pensar complexo: construção de um novo paradigma. In *V!RUS*. N. 3. São Carlos: Nomads USP. 2010.

FLÔR, C. C.; CASSIANI, S. O que dizem os estudos da linguagem na educação científica? *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 11 n. 2, 2011.

FOUREZ, G. Crise no Ensino de Ciências? *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 8(2), pp. 109-123, 2003.

FRANCISCO JUNIOR, W. E. Aprendendo sobre o funcionamento da ciência a partir da leitura em sala de aula. In: Atas do VII ENPEC (Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências), 2009. Florianópolis. *Anais...* Santa Catarina: ABRAPEC - Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, 2009.

FREIRE, P. *Extensão ou comunicação?* Rio de Janeiro: Ed. Paz e Terra, 1971.

FREIRE, P. *Pedagogia do oprimido*. Rio de Janeiro: ED. Paz e Terra, 1975.

GASKINS, I. W.; GUTHRIE, J. T.; SATLOW, E.; OSTERTAG, J.; SIX, L.; BYRNE, J.; CONNOR, B. Integrating instruction of science, reading, and writing: Goals, teacher development, and assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 31, n. 9, p. 1039-1056, 1994.

GASPAR, A.. *Compreendendo a Física: ensino médio*. V. 1 – Mecânica. São Paulo: Ática, 2010.

GILMORE, R.. *Alice no País do Quantum*. Editora Jorge Zahar. Rio de Janeiro, 1998, 192 p. Disponível em:

[http://moodle.stoa.usp.br/file.php/925/Material_Complementar/ALICE_NO_PAIS_DO_QUANTUM - A FISICA QUANTICA AO ALCANCE DE TODOS - ROBERT GILMORE.pdf](http://moodle.stoa.usp.br/file.php/925/Material_Complementar/ALICE_NO_PAIS_DO_QUANTUM_-_A_FISICA_QUANTICA_AO_ALCANCE_DE_TODOS_-_ROBERT_GILMORE.pdf). Acesso em 10 de agosto de 2012.

GLYNN, S. M.; MUTH, K. D. Reading and writing to learn science: Achieving scientific literacy. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 31, n. 9, p. 1057-1073, 1994.

GOMES, E. F.; SOUZA, R. M.; PIASSI, L. P. C. O romance de ficção científica e o ensino de física: mediação sob o olhar da filosofia da diferença. In: Atas do XII EPEF

(Encontro de Pesquisa em Ensino de Física), 2010, Águas de Lindóia. *Anais...* São Paulo: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 2010.

GOMES-MALUF, M. C.; SOUZA, A. R. A ficção científica e o ensino de ciências: o imaginário como formador do real e do racional. *Ciência & Educação*, Bauru, SP, v. 14, n. 2, p. 271-282, 2008. Disponível em: <<http://www2.fc.unesp.br/cienciaeducacao/viewarticle.php?id=628>>. Acesso em: 26/12/2012.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória. *Revista Investigações em Ensino de Ciências*, v. 6, n. 1, 2001.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma proposta para o ensino de Mecânica Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 23, n. 4, p. 444-457, 2001.

GUERRA, A.; FREITAS, J.; REIS, J.C.; BRAGA, M. A.. A interdisciplinaridade no ensino das ciências a partir de uma perspectiva histórico-filosófica. *Cad. Cat. Ens. Fís.*, v.15, n.1: p. 32-46, 1998.

GUERRA, A.; MENEZES, A. M. S. Literatura na física: uma possível abordagem para o ensino de ciências? . In: Atas do VII ENPEC (Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências), 2009. Florianópolis. *Anais...* Santa Catarina: ABRAPEC - Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, 2009.

GURGEL, I. PIETROCOLA, M. O papel da imaginação no pensamento científico: análise da criação científica de estudantes em uma atividade didática sobre o espalhamento de Rutherford. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v. 28, n. 1: p. 91-122, abr. 2011.

GURGEL, I; PIETROCOLA, M. Uma discussão epistemológica sobre a imaginação científica: a construção do conhecimento através da visão de Albert Einstein. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, n. 1, 2011.

HARRISON, A. G.; TREAGUST, D. F. Teaching with analogies: A case study in grade-10 optics. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 30, n.10, p. 1291-1307, 1993.

HOBBS, E. *Era dos extremos: o breve século XX: 1914-1991*. São Paulo. Companhia das Letras, 1995.

HOLLIDAY, G, W; YORE, L, D; ALVERMANN, D, E. The reading–science learning–writing connection: Breakthroughs, barriers, and promises. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 31, n. 9, p. 877-893, 1994.

HYND, C. R; MCWHORTER, J. Y; PHARES, V. L; SUTTLES, C. W. The role of instructional variables in conceptual change in high school physics topics. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 31, n. 9, p. 933-946, 1994.

JOURNAL OF RESEARCH IN SCIENCE TEACHING. *The Reading Science Learning Writing Connection*, John Wiley & Sons, Inc. 31, n. 9, 1994, 198p.

KEMPER, A.; ZIMMERMANN, E.; GASTAL, M. L. Textos populares de divulgação científica como ferramenta didático-pedagógica: o caso da evolução biológica. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 10, n. 3, 2010.

KEYS, C. W. The development of scientific reasoning skills in conjunction with collaborative writing assignments: An interpretive study of six ninth-grade students. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 31, n. 9, p. 1003-1022, 1994.

KHLYABICH, I. *Pequena história da filosofia*. Editora e distribuidora de livros Ltda. São Paulo, 1967.

KINOUCI, O; KINOUCI J. M.; MANDRÁ, A. A. Metáforas científicas no discurso jornalístico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, n. 4, 2012.

KLEIN, M. J. Use and Abuse of Historical Teaching in Physics , in S. G. Brush & A. L. King (eds.) *History in the Teaching of Physics*, University Press of New England, Hanover, 1972.

KOSIK, K.. *Dialética do concreto*. 9ª Edição. Trad. Célia Neves e Alderico Toríbio. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2011. 230 p.

KUHN T. *A tensão essencial*. Lisboa: Edições 70, 1977.

KUHN, T. *Estudos de história do pensamento científico*. 2. ed. Tradução de Márcio Ramalho. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1991. 388 p.

LABURÚ, C. E.; SILVA, O. H. M. Multimodos e múltiplas representações: Fundamentos e perspectivas semióticas para a aprendizagem de conceitos científicos. *Revista Investigações em Ensino de Ciências*, v. 16, N. 1, pp. 7-33, 2011.

LAKOFF, G.; JOHNSON, M. *Metaphors We Live By*. University of Chicago, Chicago, 1980.

LAKOFF, G.; NÚÑEZ, R. *Where Mathematics Comes From*. Basic Books, New York, 2000.

LAWSON, A.E. The importance of analogy: A prelude to the special issue. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 30, n.10, p. 1213-1214, 1993.

LAWSON, D. I.; LAWSON, A. E. Neural principles of memory and a neural theory of analogical insight. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 30, n.10, p. 1327-1348, 1993.

LIMA, L.G. O estudo do Movimento Retilíneo Uniforme dos corpos através da leitura de trechos da 2ª Jornada do livro Diálogo Sobre os Dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico e Copernicano, de Galileu Galilei. *Revista Física na Escola*, v. 13, n. 1, 2012.

LIMA, M. C. B. Explique o que tem nessa história. *Tese* (Doutorado em Educação). Faculdade de Educação – USP, São Paulo, 2000.

LIMA, M. C. B.; BARROS, H. L.; TERRAZAN, E. A. Quando o sujeito se torna pessoa: uma articulação possível entre Poesia e ensino de Física. *Ciência & Educação*, Bauru, SP, v. 10, n. 2, 2004. Disponível em: <http://www2.fc.unesp.br/cienciaeducacao/viewarticle.php?id=26>. Acesso em: 26/12/2012.

LONDERO, L. S.; TERRAZAN, E. A. As analogias no ensino de conteúdos conceituais de física. . In: Atas do V ENPEC (Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências), n. 5, 2005. Bauru. *Anais...* São Paulo: ABRAPEC - Associação Brasileira de Pesquisa em Ciências, 2005.

LOPES, A.R.C. *Conhecimento escolar: ciência e cotidiano*. Rio de Janeiro: Ed. UERJ, 1999.

LOPES, E. M.; SALOMÃO, S. R. O uso da literatura no ensino de ciências no primeiro segmento do ensino fundamental: Desafios e possibilidades. . In: Atas do VII ENPEC (Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências), 2009. Florianópolis.

Anais... Santa Catarina: ABRAPEC - Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, 2009.

LUCAS, D. Física moderna no Ensino Médio: com a palavra os autores dos livros didáticos do PNLEM. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, n. 2, 2012.

LUCKMANN, T., BERGER, P. *A construção social da realidade*. Petrópolis, Vozes, 2008.

LÜDKE, M.; L.; ANDRÉ, M. E. D. A. *Pesquisa Em Educação: Abordagens Qualitativas*. Editora Pedagógica Universitária. São Paulo, 1986.

MACHI, F.; LEITE, C. A leitura no ensino de física no cenário dos periódicos nacionais. In: Atas do XII EPEF (Encontro de Pesquisa em Ensino de Física), 2010, Águas de Lindóia. *Anais...* São Paulo: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 2010.

MARICONDA, P.R.. *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo Ptolomaico e Copernicano*. 2ª edição. Imprensa Oficial. São Paulo, 2004.

MARTINS, R. A.. Como distorcer a física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica. *Caderno Catarinense de Ensino de Física* 15 (3): 243-300, 1998.

MARTINS, R. A. Arquimedes e a coroa do rei: problemas históricos. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* 15 (2): 115-121, 2000.

MARX, K. *O Capital*, III, séc. VII, cap. XLVIII, III, 1959. Disponível em: <http://www.marxists.org/archive/marx/works/download/pdf/Capital-Volume-III.pdf>.

Acessado em 28 de dezembro de 2012.

MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a Tendência atual de reaproximação. *Cad. Cat. Ens. Fís.*, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995.

MECKE, K. R. A Imagem da Literatura na Física. *Gazeta de Física*, nov. 2004.

Disponível em: <http://www.theorie1.physik.uni-erlangen.de/mecke/publ.html>. Acesso em: 02 de junho de 2012.

MELHORATO, R. L.; NICOLI, G. T. Da física clássica a moderna: o simples toque de uma sirene. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, n. 3, 2012.

MENEZES, A. M. S.; GUERRA, A. Física e Literatura: Intersecções Possíveis em Sala de Aula. In: Atas do XVIII SNEF (Simpósio Nacional de Ensino de Física), 2009, Vitória. *Anais...* Espírito Santo: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 2009.

MENEZES, L. C. *A matéria uma aventura do espírito*. Livraria da Física. São Paulo, 2005.

MENEZES, L.C., KAWAMURA, R.D.; HOSOUME, Y. Objetos e objetivos no aprendizado da Física. In: Atas do IV EPEF (Encontro de Pesquisa em Ensino de Física), 4, 1994, Florianópolis. *Anais...* Santa Catarina: SBF (Sociedade Brasileira de Física): UFSC, 1994.

MENEZES, L.C., *Uma Física para o Novo Ensino Médio*. Física na Escola. v. 1, n.1, p.7, out. 2000.

MILLAR, R.; OSBORNE, J. *Beyond 2000: science for the future*. London: King's College. 1998.

MONTEIRO, I. C. C.; GASPAR, A.; MONTEIRO, M. A. A. A motivação dos alunos num contexto de leitura de texto de divulgação científica. In: Atas do XVI SNEF (Simpósio Nacional de Ensino de Física), 2005, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBF (Sociedade Brasileira de Física), CEFET, 2005.

NASCIMENTO, C.; BARBOSA-LIMA, M. C. O ensino de física nas séries iniciais do ensino fundamental: Lendo e escrevendo histórias. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 6, n. 3, 2006.

NASCIMENTO, T. G.; REZENDE JUNIOR, M. F. A produção sobre divulgação científica na área de educação em ciências: Referenciais teóricos e principais temáticas. *Revista Investigações em Ensino de Ciências*, v. 15, n. 1, pp. 97-120, 2010.

NETO, P. C. P. Júlio Verne: o propagandista das ciências. *Revista Ciência e Ensino*, n. 12. Campinas, 2004.

NIGRO, R. G.; TRIVELATO, S. L. F. Leitura de textos de ciências de diferentes gêneros: um olhar cognitivo-processual. *Revista Investigações em Ensino de Ciências*, v. 15, n. 3, pp. 553-573, 2010.

NORRIS, S. P; GUILBERT, S.M.; PHILIPS, L.M.; SHAHRAM, H.; SMITH, M.L. A *theoretical framework for narrative explanation in science*. *Science Education*, v. 89, n. 4, p. 535-563, 2005.

NORRIS, S. P; PHILLIPS, L. M. Interpreting pragmatic meaning when reading popular reports of science. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 31, n. 9, p. 947-967, 1994.

NORY, R. M.; ZANETIC, J. O teatro e a física: a cena que não entra em sala. In: Atas do XVI SNEF (Simpósio Nacional de Ensino de Física), 2005, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBF (Sociedade Brasileira de Física), CEFET, 2005.

OLIVEIRA, M. K.; REGO, T. C. História da Pedagogia. *Revista Educação*. Editora Segmento. São Paulo, 2010.

ORTONY, A. Why metaphors are necessary and not just nice. *Education Theory*, v. 25, p. 45-53, 1975.

OSTERMANN, F. A epistemologia de Kuhn. *Cad.Cat.Ens.Fis.*, v.13, n3: p.184-196, dez.1996.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”. *Revista Investigações em Ensino de Ciências*, v. 5, n. 1, 2000.

OTERO, M. R.; MOREIRA, M. A.; GRECA, M. I. El uso de imágenes en textos de física para la enseñanza secundaria y universitaria. *Revista Investigações em Ensino de Ciências*, v. 7, n. 2, pp. 127-154, 2002.

PADILHA, J. N.; CARVALHO, A. M. P. Relações entre os gestos e as palavras utilizadas durante a argumentação dos alunos em uma aula de conhecimento físico. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 11, n. 2, 2011.

PAULA, H. F.; BORGENS, A. T. A compreensão dos estudantes sobre o papel da imaginação na produção das ciências. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v. 25, n. 3: p. 478-506, dez. 2008.

PAULA, H. F.; LIMA, M. E. C. C. L. Formulação de questões e mediação da leitura. *Revista Investigações em Ensino de Ciências*, v. 15, n. 3, pp. 429-461, 2010.

PAULO, I. J. C.; MOREIRA, M. A. O problema da linguagem e o ensino da mecânica quântica no nível médio. *Ciência & Educação*, Bauru, SP, v. 17, n. 2, 2011. Disponível em: <http://www2.fc.unesp.br/cienciaeducacao/viewarticle.php?id=614>. Acesso em 26/12/2012.

PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F. Recursos e Restrições nas explicações de futuros professores de física sobre mecânica quântica. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 12, n.2, 2012.

PEREIRA, J. M.; LONDERO, L. O ensino de partículas elementares por meio da leitura de “Alice no País do Quantum”. In: Atas do XX SNEF (Simpósio Nacional de Ensino de Física), 2013, São Paulo. *Anais...* São Paulo: SBF (Sociedade Brasileira de Física), USP, 2013.

PESSOA JÚNIOR, O.. *Conceitos de Física Quântica*. Livraria da Física. São Paulo, 2003.

PESSOA JÚNIOR, O. Quando a Abordagem Histórica deve ser usada no Ensino de Ciências? *Revista Ciência e Ensino*, 1996.

PIASSI, L. P. C. A perspectiva sociocultural da física nos romances de ficção científica de Arthur Clarke. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 11, n. 2, 2011.

PIASSI, L. P. C. *Contatos: a ficção científica no ensino de ciências em um contexto sociocultural*. 2007. Tese (Doutorado em Educação) - Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

PIASSI, L. P. C; OLIVEIRA, M. P. P. Ficção científica no ensino de física: utilizando um romance para desenvolver conceitos. In: Atas do XVI SNEF (Simpósio Nacional de Ensino de Física), 2005, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBF (Sociedade Brasileira de Física), CEFET, 2005.

PIASSI, L. P.; PIETROCOLA, M.. Quem conta um conto aumenta um ponto também em física: contos de ficção científica na sala de aula. In: Atas do XVII SNEF (Simpósio

Nacional de Ensino de Física), 2007, São Luís. *Anais...* Maranhão: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 2007.

PIETROCOLA, M.. A Matemática como Estruturante do Conhecimento Físico.

Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v.19, n.1, p.93-114, abr. 2002.

PIETROCOLA, M.; SIQUEIRA, M.. *A Transposição Didática aplicada a Teoria Contemporânea: A Física de Partículas no Ensino Médio*. X Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física. Londrina, 2006.

PINTO, A. A.; RABONI, P. C. A. Concepções de ciência na literatura infantil brasileira: conhecer para explorar possibilidades. . In: Atas do V ENPEC (Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências), n. 5, 2005. Bauru. *Anais...* São Paulo: ABRAPEC - Associação Brasileira de Pesquisa em Ciências, 2005.

RAMALHO JUNIOR, F.; FERRARO, N.G.; SOARES, P. A. T. *Fundamentos da Física I Mecânica*. Editora Moderna. São Paulo, 2012.

REZENDE, F.; OSTERMANN F.; FERRAZ, G. Ensino-aprendizagem de física no nível médio: o estado da arte da produção acadêmica no século XXI. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 31, n. 1, 2009.

RICARDO, E. C. Elementos físicos e matemáticos da mecânica analítica, a relação entre as duas ciências e a vigilância epistemológica. *Tese de Livre-Docente*. Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, 2012.

RICARDO, E. C. Física. In: *Orientações Curriculares do Ensino Médio*. MEC: Brasília, 2004.

RICARDO, E. C.; FREIRE, J. C. A. A concepção dos alunos sobre a física do ensino médio: um estudo exploratório. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 2, p. 251-266, 2007.

RICARDO, E.C.; CUSTÓDIO, J.F.; REZENDE JUNIOR, M.F.. A tecnologia como referência dos saberes escolares: perspectivas teóricas e concepções dos professores. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 1, p. 135-147, 2007.

RIVARD, L. O. P. A review of writing to learn in science: Implications for practice and research. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 31, n. 9, p. 969-983, 1994.

ROBILOTTA, M. R. O Cinza, o Branco e o Preto – da relevância da História da Ciência no ensino da Física. *Caderno Catarinense do Ensino de Física*, v.5 (número especial), p. 07-22, jun. 1988.

SALTIEL, E.. 'Concepts cinématiques et raisonnements naturels: etude de La comprehension des changements de referentiels galileens par etudiants en sciences'. *Tese de doutorado*. Universidade Paris VII, Paris 1978.

SASSERON, L. H.; CARVALHO, A. M. P. Alfabetização científica: Uma revisão bibliográfica. *Revista Investigações em Ensino de Ciências*, v. 16, n. 1, pp. 59-77, 2011.

SCHWARTZ, D. The construction and analogical transfer of symbolic visualizations. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 30, n.10, p. 1309-1325, 1993.

SEE/SP. Secretaria de Estado da Educação de São Paulo. *Proposta Curricular do Estado de São Paulo: Física*. São Paulo, 2008.

SILVA, C. A.; MARTINS, M. I. Analogias e metáforas nos livros didáticos de física. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v. 27, n. 2: p. 255-287, ago. 2010.

SILVA, H. C. da; ZIMMERMANN, E; CARNEIRO, M. H. S; GASTAL, M. L.; CASSIANO, W. S.. Cautela ao usar imagens em aulas de ciências. *Ciência & Educação*, Bauru, SP, v. 12, n. 2, 2006. Disponível em: <<http://www2.fc.unesp.br/cienciaeducacao/viewarticle.php?id=137>>. Acesso em: 26/12/2012.

SILVA, H. C.; ALMEIDA, M. J. P. M. O deslocamento de aspectos do funcionamento do discurso pedagógico pela leitura de textos de divulgação científica em aulas de física. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 4, nº 3, 2005.

SILVA, L. L.; ALMEIDA, M. J. P. M. Linguagem analógica: prós e contras na literatura sobre ensino de física no Brasil. In: Atas do XI EPEF (Encontro de Pesquisa em Ensino de Física), 2008, Curitiba. *Anais...* Paraná: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 2008.

SILVA, L. L.; TERRAZAN, E. A. Familiaridade de alunos de ensino médio com situações análogas. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v. 26, n. 1: p. 145-172, abr. 2009.

SILVEIRA, M. P. O potencial de relações entre ensino de ciências e literatura por meio da obra de Monteiro Lobato. *Anais... 1º CIELLI/4º CELLI*. Maringá-PR, 2010.

SNOW, C. P. *As duas culturas e uma segunda leitura: Uma versão ampliada das duas culturas e a revolução científica*. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 1995.

SOUZA, R. R.; SOUZA, P. H. Textos com erros conceituais e o ensino de física. . In: Atas do V ENPEC (Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências), n. 5, 2005. Bauru. *Anais...* São Paulo: ABRAPEC - Associação Brasileira de Pesquisa em Ciências, 2005.

SOUZA, V. C. A.; JUSTI, R. S.; FERREIRA, P. F. M. Analogias utilizadas no ensino dos modelos atômicos de Thompson e Bohr: Uma análise crítica sobre o que os alunos pensam a partir delas. *Revista Investigações em Ensino de Ciências*, v. 11, n. 1, pp. 7-28, 2006.

SPIEGEL JUNIOR, G. F.; BARUFALDI, J. P. The effects of a combination of text structure awareness and graphic postorganizers on recall and retention of science knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 31, n. 9, p. 913-932, 1994.

STAVY, R.; TIROSH, D. When analogy is perceived as such. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 30, n.10, p. 1229-1239, 1993.

STRACK, R.; LOGUÉRCIO, R.; DEL PINO, J. C.. Percepções de professores de ensino superior sobre a literatura de divulgação científica. *Ciência & Educação*, Bauru, SP, v. 15, n. 2, p. 425-42, 2009. Disponível em: <<http://www2.fc.unesp.br/cienciaeducacao/viewarticle.php?id=351>>. Acesso em: 26/12/2012.

SUTTON, C. Figuring out a scientific understanding. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 30, n.10, p. 1215-1227, 1993.

TEIXEIRA, F. M.; MENDES, I. A.; Na mesa com Alice: sobre diálogos matemáticos a partir da obra de Lewis Carroll. *X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação* – Universidade do Vale do Paraíba. São José dos Campos. São Paulo. 2006.

TERRAZAN, E. A.. Analogias e metáforas no ensino de ciências naturais. In: Atas do V EPEF (Encontro de Pesquisa em Ensino de Física), 1996, Águas de Lindóia. *Anais...* São Paulo: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 1996, p. 347- 356.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na escola de 2 ° grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v.9, n.3: p. 209-214, dez.1992.

TERRAZAN, E.A.; FELTRIN, C.C.. Analogias em aulas de física: exemplos em eletricidade e óptica. *Atas do VII EPEF*. Florianópolis. Santa Catarina. 2000.

TRIVIÑOS, A. N. S. *Introdução à Pesquisa em Ciências Sociais: A Pesquisa Qualitativa em Educação*. Editora Atlas. São Paulo, 1987.

VALENTE, L.; BARCELLOS, M; ZANETIC, J. Entrevista com Einstein. . In: Atas do XVII SNEF (Simpósio Nacional de Ensino de Física), 2007, São Luís. *Anais...* Maranhão: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 2007.

VIENNOT, L.. '*Le raisonnement spontann e en dynamic elementaire*', Tese de doutorado. Universidade Paris VII, Paris 1977.

VIERNE, S.. Ligações tempestuosas: A ciência e a literatura. In.: CORBOZ, A. et. al. *Ciência e imaginário*. Brasília: Editora UnB, 1994.

VYGOTSKY, L. S.. *Obras Escogidas Tomo II*. Madrid: Visor Distribuciones. 1994, p. 512.

VYGOTSKY, L.S.. *Pensamento e Linguagem*. Editora Martins Fontes. São Paulo, 2008.

WATANABE, G.; GURGEL, I. A imaginação como processo de criação na arte e na física: uma discussão sobre a dualidade no entendimento. In: Atas do XIX SNEF (Simpósio Nacional de Ensino de Física), 2011, Manaus. *Anais...* Amazonas: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 2011.

WELLEK, R.; WARREN, A. *Teoria da literatura*. Tradução de José Palla e Carmo.

Lisboa: Publicações Europa-América, 1962.

WHITAKER, M. A. B. History and Quasi-history in Physics Education Pts I, II.

Physics Education, 14, 108-112, 239-242, 1979.

WOLCOTT, H. W. Criteria for an ethnographic approach to research in education.

Human Organization, v. 34, 1975.

WONG, E. D. Understanding the generative capacity of analogies as a tool for

explanation. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 30, n.10, p. 1259-1272, 1993.

ZAMBON L. B.; TERRAZZAN, E. A. Analogias produzidas por alunos do ensino

médio em aulas de física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 35, n. 1, 2013.

ZANETIC, J. Ciência e Arte: Aproximações no ensino de Física e na formação de

professores de Física. . In: Atas do XVII SNEF (Simpósio Nacional de Ensino de

Física), Mesa Redonda 4, 2007, São Luís. *Anais...* Maranhão: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 2007.

ZANETIC, J. *Física ainda é cultura!* In: MARTINS, A. F. P. (org.) Física ainda é

cultura? São Paulo: Editora Livraria da Física p. 176-189, 2009.

ZANETIC, J. Física e Arte: uma ponte entre duas culturas. *Pro-Posições* (Unicamp),

Campinas, v. 17, n. 1, p. 39-58, 2006.

ZANETIC, J. Física e arte: uma ponte entre duas culturas. In: Atas do IV ENPEC

(Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências), 8, 2002, Águas de Lindóia.

Anais... São Paulo: ABRAPEC - Associação Brasileira de Pesquisa em Ciências, 2002.

1 cd-rom.

ZANETIC, J. Física e Cultura. *Cienc. Cult.*, São Paulo, v. 57, n. 3, 2005.

ZANETIC, J. Física e literatura: construindo uma ponte entre as duas culturas. *Hist. cienc. Saúde-Manguinhos*, Rio de Janeiro, 2006.

ZANETIC, J. Física e literatura: uma possível integração no ensino. In: Atas do V EPEF (Encontro de Pesquisa em Ensino de Física), 1996, Águas de Lindóia. *Anais...* São Paulo: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 1996, p. 27-33.

ZANETIC, J. Física e literatura: uma possível integração no ensino. *Cadernos Cedes: Ensino da Ciência, Leitura e Literatura*, 41, 1997, p. 46/61.

ZANETIC, J. Física e literatura: uma possível integração no ensino. In: Atas do V EPEF (Encontro de Pesquisa em Ensino de Física), 1996, Águas de Lindóia. *Anais...* São Paulo: SBF (Sociedade Brasileira de Física), 1996, p. 27-33.

ZANETIC, J. *Física Também é Cultura*. Tese submetida à Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Educação. Orientador: Luís Carlos de Menezes. 1989.

ZANETIC, J. Literatura e cultura científica. In: ALMEIDA, Maria José P. M. de; SILVA, Henrique César da (orgs.). *Linguagens, leituras e ensino da ciência*. Campinas: Mercado de Letras, 1998, p. 11-36.

ZILBERMAN, R. *Teoria da Literatura I*. Editora IESDE. Curitiba, 2012.

10. ANEXOS

ANEXO I

Robert Gilmore

Alice no País do Quantum

A física quântica ao alcance de todos

<http://groups-beta.google.com/group/digitalsource>

SUMÁRIO

Prefácio

No País do Quantum

O Banco Heisenberg

O Instituto de Mecânica

A Escola de Copenhague

A Academia Fermi-Bose

Realidade Virtual

Átomos no Vácuo

O Castelo Rutherford

O Baile de Massacarados das Partículas

A Pheira Phantástica da Física Experimental

Prefácio

Na primeira metade do século XX, nossa compreensão do Universo foi virada de pernas para o ar. As antigas teorias clássicas da física foram substituídas por uma nova maneira de olhar o mundo — a mecânica quântica. Esta estava em desacordo, sob vários aspectos, com as ideias da antiga mecânica newtoniana; na verdade, sob vários aspectos, estava em desacordo com nosso senso comum. Entretanto, a coisa mais estranha sobre essas teorias é seu extraordinário sucesso em prever o comportamento observado dos sistemas físicos. Por mais absurda que a mecânica quântica possa nos parecer, esse parece ser o caminho que a Natureza escolheu — logo, temos que nos conformar.

Este livro é uma alegoria da física quântica, no sentido

dicionarizado de "uma narrativa que descreve um assunto sob o disfarce de outro." O modo pelo qual as coisas se comportam na mecânica quântica parece muito estranho para nossa maneira habitual de pensar e torna-se mais aceitável quando fazemos analogias com situações com as quais estamos mais familiarizados, mesmo quando essas analogias possam ser inexatas. Tais analogias não podem nunca ser uma representação verdadeira da realidade, na medida em que os processos quânticos são de fato bastante diferentes de nossa experiência ordinária.

Uma alegoria é uma analogia expandida, ou uma série de analogias. Como tal, este livro segue mais os passos de *Pilgrim's Progress* ou *As viagens de Gulliver* do que *Alice no País das Maravilhas*. Alice parece o modelo mais conveniente, no entanto, quando examinamos o mundo que habitamos.

O País do Quantum por onde Alice viaja se parece mais com um parque temático no qual Alice é às vezes uma observadora, ao passo que algumas vezes se comporta como uma espécie de partícula cuja carga elétrica pode variar. Esse País do Quantum mostra os aspectos essenciais do mundo quântico: o mundo que todos nós habitamos.

Grande parte da história é pura ficção e os personagens são imaginários embora as notas que descrevem o "mundo real" sejam verdadeiras. Através da narrativa você encontrará muitas afirmações obviamente absurdas e bastante divergentes do senso comum. Em sua maior parte, elas são verdadeiras. Niels Bohr, o pai da Mecânica Quântica em seus primórdios, é conhecido por ter observado que qualquer um que não tenha ficado aturdido ao pensar na teoria quântica não a compreendeu.

Com seriedade, embora...

A descrição do mundo proposta pela mecânica quântica é sem dúvida interessante e notável, mas estaríamos seriamente preparados

para acreditar que é verdadeira? Curiosamente achamos que estamos. Para frisar essa afirmação, ao longo deste livro você encontrará breves notas que enfatizam a importância da mecânica quântica no mundo real. As notas são mais ou menos assim:

Essas notas resumem a importância, para o nosso mundo, dos tópicos quânticos encontrados por Alice em cada capítulo. Elas pretendem ser suficientemente não intrusivas, de modo que você pode ignorá-las enquanto estiver lendo a história das aventuras de Alice, mas se quiser descobrir o real significado dessas aventuras, as notas estão convenientemente próximas.

Há também algumas notas longas nos finais de capítulo. Elas esclarecem alguns dos pontos-chave no texto e são assim caracterizadas: Ver nota 1 no final do Capítulo

Vários aspectos pelos quais a teoria quântica descreve o mundo podem parecer absurdos à primeira vista — e possivelmente podem assim parecer da segunda, terceira e vigésima quinta vez. E, no entanto, o único jogo na cidade. A antiga mecânica clássica de Newton e seus seguidores é incapaz de dar qualquer ripo de explicação para os átomos e outros microssistemas. A mecânica quântica concorda muito bem com a observação. Os cálculos são frequentemente difíceis e entediante, mas, onde foram efetuados, se adequaram perfeitamente ao que fora realmente observado.

É impossível enfatizar suficientemente o notável sucesso prático da mecânica quântica. Embora o resultado de uma medida possa ser aleatório e imprevisível, as previsões da teoria quântica se ajustam

consistentemente aos resultados médios obtidos a partir de muitas medidas. Qualquer observação macroscópica envolverá inúmeros átomos e, portanto, inúmeras observações em escala atômica. De novo veremos que a mecânica quântica é bem-sucedida, na medida em que automaticamente se adequa aos resultados da mecânica clássica para objetos macroscópicos. O inverso não é verdadeiro.

A teoria quântica foi desenvolvida para explicar observações feitas nos átomos. Desde sua concepção, foi aplicada com sucesso ao núcleo atômico, à interação forte de partículas que provém do núcleo e ao comportamento dos quarks dos quais são compostas. A aplicação da teoria foi estendida por um fator de algo como cem bilhões. Os sistemas considerados tanto diminuíram em tamanho como aumentaram em energia por esse fator. É um longo caminho de extrapolação de uma teoria a partir de sua concepção original, mas até aqui a mecânica quântica parece estar apta a lidar com esses sistemas extremos.

Até o ponto em que foi investigada, a mecânica quântica parece ser de aplicabilidade universal. Em uma escala macroscópica, as previsões da teoria quântica perdem seu aspecto aleatório e se adequam às da mecânica clássica, que trabalha muito bem com objetos grandes. Em uma escala microscópica, no entanto, as previsões da teoria quântica são consistentemente confirmadas em experimentos. Até mesmo essas previsões, que parecem implicar um retrato absurdo do mundo, estão sustentadas pela evidência experimental. Intrigantemente, como discutido no Capítulo 4, a mecânica quântica parece estar numa estranha posição de se adequar a todas as observações feitas, embora se discuta quais observações podem efetivamente ser feitas. Parece que o mundo é mais estranho do que imaginamos e talvez mais estranho do que possamos imaginar.

Enquanto isso, porém, vamos acompanhar Alice em seu início de jornada pelo País do Quantum.

Robert Gilmore

1

No País do Quantum

Alice estava entediada. Todos os seus amigos estavam de férias, visitando os parentes e ela, por causa da chuva, ficou trancada em casa, vendo televisão. Naquela tarde já tinha assistido ao quinto episódio de um curso de introdução ao Esperanto, a um programa de jardinagem e a uma propaganda política. Alice estava entediada de verdade.

Olhou para o livro que estava no chão, ao lado da cadeira. Era uma edição de Alice no País das Maravilhas que ela, mais cedo naquele dia, tinha deixado por ali ao acabar de ler. "Não sei por que não pode haver desenhos e programas mais interessantes na televisão", divagava. "Queria ser como a outra Alice. Ela estava entediada e descobriu o caminho para uma terra cheia de seres interessantes e acontecimentos estranhos. Se houvesse algum jeito de encolher para flutuar através da tela da televisão, talvez eu pudesse encontrar várias coisas fascinantes."

Frustrada, ela olhava para a tela, onde naquele momento uma imagem do primeiro-ministro dizia que, feitas todas as considerações, as coisas estavam bem melhores do que três anos antes, ainda que nem sempre parecessem assim. Ficou um pouco surpresa ao ver a imagem do rosto do primeiro-ministro se desmanchar devagarinho e se transformar numa névoa de pontinhos brilhantes que dançavam e que pareciam fluir para dentro da TV, como se estivessem chamando por ela. "Puxa", disse Alice, "acho que eles querem que eu os siga!" Levantou-se de um salto e foi em direção à televisão, mas tropeçou no livro que tinha displicentemente largado no chão, e caiu de cabeça.

Enquanto caía, espantou-se ao ver a tela ficar enorme, e se surpreendeu cercada pelos pontinhos dançantes que fluíam para dentro da imagem. "Não consigo ver nada com esses pontos dando voltas ao meu redor", pensou. "E como estar perdida numa tempestade de neve. Não consigo nem mesmo ver meus pés. Queria ver so um pouquinho. Não dá nem para saber onde estou."

Naquele momento, Alice sentiu seus pés encostarem em algo sólido e se viu sobre uma superfície plana e dura. A sua volta os pontinhos começavam a sumir e ela percebeu que estava cercada por formas indefinidas.

Olhou mais de perto para a que estava mais próxima e observou uma figura pequena, da altura da sua cintura, no máximo. Era muito difícil defini-la, pois ficava pulando de um lado para outro e se mexendo tão rápido que mal dava para ver direito. A forma parecia estar carregando algum tipo de bengala, ou talvez um guarda-chuva fechado, que ficava apontado para cima. "Olá", Alice se apresentou educadamente. "Eu sou a Alice. Posso saber quem você é?"

"Sou um elétron", disse a forma. "Sou um elétron spin-para cima. É fácil me distinguir da minha amiga ali, a elétron spin-para baixo, que é obviamente muito diferente de mim." E disse para si mesmo, num tom

baixinho, algo que soou como "Vive la différence". Pelo que Alice pôde ver, o outro elétron era quase igual, a não ser pelo guarda-chuva, ou o que quer que fosse aquilo, que apontava para baixo, na direção do chão. Era difícil ter certeza, uma vez que a figura também escava pulando de um lado para outro, tão rapidamente quanto a primeira.

"Por favor", disse Alice a seu mais novo conhecido. "Poderia fazer a gentileza de parar por um momento para que eu possa vê-lo com mais clareza?"

"Sou bastante gentil", disse o elétron, "mas receio que não haja espaço bastante. Mas vou tentar, de qualquer forma." Assim dizendo, ele começou a diminuir a sua taxa de agitação. Mas quanto mais devagar se movia, mais se expandia para os lados e mais difuso ia ficando. Naquele momento, apesar de não se mover rapidamente, ele estava tão indefinido e tão fora de foco que Alice não conseguia vê-lo com mais clareza do que antes. "Isto é o melhor que posso fazer", resfolegou o elétron. "Receio que quanto mais lentamente eu me mover, mais espalhado eu fico. As coisas são assim aqui no País do Quantum: quanto menos espaço você ocupa, mais rápido você tem de se mover, é uma das regras, e não há nada que eu possa fazer."

"Realmente não há espaço para diminuir a velocidade aqui", continuou o companheiro de Alice enquanto recomeçava a pular rapidamente de um lado para outro. "A estação está ficando tão lotada, que preciso ser mais compacto." De fato, no espaço em que Alice se encontrava estava lotado pelas figurinhas que se espremiavam uma ao lado da outra, dançando e se movendo febrilmente.

Partículas no nível atômico diferem de objetos em escala macroscópica. Elétrons são muito pequenos e não apresentam características particulares, sendo completamente idênticos uns aos outros. De fato, eles têm algum tipo de rotação, apesar de não ser possível dizer exatamente o que é que está em rotação. Uma característica peculiar é que todos os elétrons giram à mesmíssima taxa, não importando em que direção a rotação é medida. A única diferença é que uns giram em uma direção e outros giram em outra direção. Dependendo da sua direção da rotação, os elétrons são conhecidos como spin-para cima ou spin-para baixo.

"Que seres estranhos", pensou Alice. "Acho que nunca conseguirei ver como são de verdade já que não param quietos e nada indica que um dia pararão." Porque não parecia ser possível fazê-los se moverem mais devagar ela resolveu tentar um outro assunto. "Você poderia me dizer por gentileza

que tipo de estação é esta onde nós estamos?", ela perguntou.

"Numa estação ferroviária, é claro", respondeu alegremente um dos elétrons (era muito difícil para Alice dizer qual deles tinha falado, pois todos eram muitíssimo parecidos). "Vamos pegar o trem de ondas para aquela tela que você vê. Você vai pegar depois o expresso fóton, acredito, se quiser ir mais longe."

"Está falando da tela de televisão?", Alice perguntou.

"Ora essa, é claro", disse alto um dos elétrons. Alice podia jurar que não tinha sido o mesmo que respondera à primeira pergunta, mas era muito difícil ter certeza. "Venha! O trem está aqui e temos de embarcar."

De fato, Alice pôde ver uma fila de pequenos vagões alinhados na estação. Eram todos bem pequenos. Alguns estavam vazios, alguns estavam ocupados por um elétron, e outros por dois elétrons. Os vagões enchiam-se rapidamente — na verdade, parecia que não restava mais nenhum vazio — mas Alice percebeu que nenhum dos vagões levava mais do que dois elétrons. Quando eles passavam perto desses vagões, os dois ocupantes gritavam "Lotado! Lotado!".

"Vocês não poderiam espremer mais do que dois num vagão, estando o trem assim tão cheio?", Alice perguntou a seus companheiros.

"Oh, não! Nunca além de dois elétrons juntos, esta é a regra."

"Acho então que teremos de ocupar vagões diferentes", disse Alice um pouco contrariada, mas o elétron a tranquilizou.

O princípio da incerteza de Heisenberg diz que nenhuma partícula pode ter valores bem definidos para posição e velocidade ao mesmo tempo. Isto significa que uma partícula não pode permanecer estacionária numa determinada posição, já que uma partícula estacionária tem uma velocidade bem definida: a velocidade de valor zero.

"Você não é problema algum! Você pode entrar no vagão que quiser, é claro!"

"Não vejo como isso será possível", respondeu Alice. "Se um vagão estiver cheio demais para vocês, com certeza não haverá espaço para mim também."

"De jeito nenhum! Os vagões só podem acomodar dois elétrons, por isso os lugares para elétrons devem estar quase todos tomados, mas você não é um elétron! Não há nenhuma outra Alice no trem, então há espaço mais do que suficiente para uma Alice em qualquer um dos vagões."

Alice não entendia tudo que ele dizia, mas, temendo que o trem partisse logo, começou a procurar um lugar vago que pudesse acomodar mais um elétron. "E este aqui?", perguntou ao seu companheiro. "Aqui tem um vagão com um elétron só. Dá para você entrar aqui?"

"Claro que não!" ele disparou, horrorizado. "Este também é um elétron spin-para cima. Não posso dividir um vagão com outro elétron spin-para cima, Que sugestão! É totalmente contra o meu princípio."

"Contra os seus princípios, é o que quer dizer?", Alice perguntou.

"Quero dizer aquilo que disse. Contra o meu princípio, ou melhor, contra o princípio de Pauli, que proíbe que dois de nós, elétrons, façamos a mesma coisa ao mesmo tempo, o que inclui ocupar o mesmo espaço e ter o mesmo spin", ele respondeu, ofendido.

Alice não conseguia entender o que o tinha deixado tão magoado, mas deu uma olhada rápida ao seu redor para ver se encontrava um outro vagão que fosse mais apropriado para ele. Acabou conseguindo achar um que abrigava um único elétron do tipo spin-para baixo, e o companheiro de Alice prontamente pulou para dentro. Alice ficou surpresa ao ver que, apesar de o pequeno vagão

agora pareci cheio, de alguma forma havia espaço o bastante para ela.

Assim que ocuparam seus lugares, o trem começou a andar. A viagem foi monótona, e a paisagem desinteressante. Tanto que Alice ficou contente ao ver que o trem diminuía de velocidade. "Esta deve ser a tela, suponho", pensou Alice. "Estou ansiosa para saber o que acontecerá agora."

Elétrons são absolutamente idênticos e obedecem ao princípio da exclusão de Pauli (ver Capítulo 5), que impede que haja mais do que um elétron no mesmo estado (ou dois, quando você inclui as diferentes direções possíveis para o spin).

Enquanto os elétrons saltavam do trem para a tela, uma grande agitação tomava conta do lugar. "O que está acontecendo?", Alice perguntava alto. "Por que todos estão tão excitados?" Suas perguntas eram respondidas por um aviso que parecia surgir do ar que a cercava.

"O fósforo da tela está agora sendo excitado pelos elétrons que chegam, e assim teremos em breve a emissão de fótons. Aguardem a partida do expresso fóton." Alice olhou à sua volta para tentar ver a chegada do expresso, quando formas brilhantes e luminosas passaram correndo através da plataforma. Alice foi pega de surpresa no meio da multidão e levada junto com ela enquanto todos se reuniam dentro do mesmo vagão. "Eles não parecem estar preocupados com nenhum princípio, de Pauli ou de qualquer outro", pensou Alice enquanto as figuras iam se espremendo em torno dela. "Estes aqui certamente não se incomodam de estar no mesmo lugar. Acho que o expresso vai partir logo. Imagino onde será... que vai parar", concluiu ao descer na outra plataforma. "Puxa! Foi uma viagem rápida, com certeza." (Alice estava corretíssima neste ponto. A viagem não durou tempo algum, pois o tempo fica efetivamente congelado para qualquer coisa que viaje com a velocidade da luz.) Novamente ela se viu cercada por uma multidão de elétrons, todos correndo para longe da plataforma.

"Venha!", um deles gritou para ela ao desembarcar. "Devemos sair da estação agora se quisermos ir a algum lugar."

"Desculpe", perguntou Alice, hesitante, "você é o mesmo elétron com quem eu estava falando antes?"

"Sou", respondeu, enquanto disparava por uma passagem lateral. Alice foi arrastada pela multidão de elétrons e conduzida através da entrada principal da plataforma.

"Puxa vida, que coisa mais irritante!", disse Alice. "Perdi de vista a única pessoa que conheço neste lugar estranho e não tenho ninguém que me explique o que está acontecendo."

"Não se preocupe, Alice", disse uma voz à altura de seu joelho. "Vou lhe mostrar aonde ir." Era um dos elétrons.

"Como sabe meu nome?" perguntou Alice com espanto.

"Simples. Sou o mesmo elétron que estava falando com você antes."

"Não pode ser!", exclamou ela. "Vi aquele elétron indo em outra direção. Talvez não fosse o mesmo com quem eu estava falando antes."

"Certamente era."

"Então você não pode ser o mesmo", disse Alice, logicamente. "Vocês não podem ser o mesmo elétron, sabia?"

"Oh, sim, podemos!", replicou o elétron. "Ele é o mesmo. Eu sou o mesmo. Nós todos somos o mesmo, sabia? Exatamente o mesmo!"

"Isto é ridículo!", argumentou Alice. "Você está aqui ao meu lado enquanto o outro foi para algum lugar naquela direção, por isso vocês dois não podem ser a mesma pessoa. Um de vocês tem de ser diferente."

"Não mesmo", gritou o elétron, pulando de um lado para outro, ainda mais rápido por causa de sua excitação. "Somos todos idênticos. Não há como nos diferenciar. Por isso, veja, ele deve ser o

mesmo e eu devo ser o mesmo também."

Nesse momento, a multidão de elétrons que rodeava Alice começou a gritar: "Eu sou o mesmo", "Eu sou o mesmo também", "Eu sou o mesmo que você é", "Eu também sou o mesmo que você." O tumulto era terrível. Alice fechou os olhos e pôs as mãos nos ouvidos até o barulho acabar.

Quando tudo estava quieto novamente, Alice abriu os olhos e abaixou as mãos. Viu que não havia mais sinal da multidão de elétrons e que ela estava sozinha, saindo pela entrada da estação. Olhando em volta, viu-se numa rua que, à primeira vista, parecia bem normal. Virou à esquerda e começou a caminhar pela calçada.

Antes que fosse muito longe, cruzou com uma figura na frente de uma passagem procurando melancolicamente algo em seus bolsos. Era baixo e muito pálido. Era difícil ver seu rosto com nitidez, assim como era o caso com todo mundo que Alice tinha conhecido recentemente. Mas ele parecia bastante com um coelho, pensou Alice. "Meu Deus! Meu Deus! Estou atrasado e não consigo entrar as minhas chaves. Eu tenho de entrar diretamente!" Assim dizendo, ele se afastou um pouco e voltou correndo em direção à porta.

Correu tão rápido que Alice não foi capaz de vê-lo em nenhuma posição. Em vez disso, viu uma série de imagens dele nas diferentes posições que ocupara ao longo do seu trajeto. As imagens iam do ponto de partida até a porta onde, ao invés de parar como Alice esperava, continuavam porta adentro, diminuindo cada vez mais até ficarem pequenas demais para serem vistas. Alice mal teve tempo de registrar essa estranha série de imagens quando a figura ricocheteou de volta na mesma velocidade, deixando novamente uma série de imagens. Dessa vez elas terminaram abruptamente com o infeliz personagem caído de costas, em cima de um bueiro. Igualmente decidido, ele se levantou e disparou de novo em direção à porta. Novamente apareceu a série de imagens que se encolhiam para dentro da porta, e novamente ele ricocheteou e acabou caindo de costas.

Enquanto Alice corria em sua direção, ele repetiu o movimento várias vezes, jogando-se contra a porta e novamente caindo de costas. "Pare, pare!", gritou Alice. "Não faça isso. Você vai acabar se machucando."

A pessoa parou de correr e olhou para Alice. "Olá, minha querida. Receio que eu deva fazer isto. Estou trancado do lado de fora e preciso entrar logo, por isso não tenho opção senão tunelar através da barreira."

Alice olhou para a porta, que era grande e sólida. "Não acho que terá muita chance de

atravessá-la correndo e se atirando contra ela", disse. "Está tentando derrubá-la?"

"Oh, não, certamente que não! Não quero destruir minha linda porta. Apenas desejo atravessá-la. Por outro lado, temo que o que disse seja verdade. A probabilidade de conseguir atravessá-la não é grande, realmente, mas devo tentar." Dizendo isso, atirou-se novamente contra a porta. Alice o abandonou, achando que seria perda de tempo, e se afastou no momento em que ele voltava cambaleante mais uma vez.

Após alguns passos, Alice não pôde resistir e deu uma olhada para trás, para ver se, por acaso, ele tinha desistido. Viu mais uma vez a série de imagens que iam em direção à porta e se encolhiam ao chegar lá. Ela esperou pelo ricochete. Das outras vezes tinha sido imediato, mas desta vez nada houve. A porta estava lá, sólida e sozinha, e não havia sinal do seu conhecido. Após alguns segundos em que nada aconteceu, Alice ouviu o ruído de trancas e correntes vindo de detrás da porta, que se abriu. Seu conhecido reapareceu e acenou para ela. "Que sorte a minha!", disse ele. "A probabilidade de penetrar uma barreira grossa como esta é realmente muito pequena. É uma sorte espantosa eu ter conseguido atravessá-la em tão pouco tempo." Fechou a porta em seguida com uma batida sólida que indicava o término daquele encontro. Alice continuou sua caminhada.

Um pouco à frente ela chegou a um terreno vazio ao lado da rua, onde um grupo de operários estava reunido em volta de uma pilha de tijolos. Alice deduziu que fossem operários, pois estavam descarregando mais tijolos de dentro de um carrinho. "Bem, pelo menos estas pessoas estão se comportando de maneira sensata", pensou consigo mesma. Naquele instante, um outro grupo dobrou a esquina correndo, carregando algo que se assemelhava a um enorme tapete enrolado, e começou a desenrolá-lo no terreno. Alice percebeu então que aquilo era algum tipo de planta baixa de um prédio. A planta parecia ser bem grande, já que cobria a maior parte do espaço disponível. "Puxa! Acho que deve ser do mesmo tamanho do prédio que eles vão construir", disse Alice, "mas como conseguirão construir alguma coisa se a planta já ocupa todo o espaço?"

Os operários acabaram de pôr a planta na posição e voltaram à pilha de tijolos. Começaram a pegar os tijolos e jogá-los aparentemente a esmo em cima da planta. Tudo estava confuso — os tijolos catam ora num lugar, ora em outro — e Alice não via nenhum objetivo nisso. "O que estão fazendo?" perguntou a um homem que estava afastado para o lado. Como ele parecia não estar fazendo nada, ela deduziu que fosse o mestre-de-obras. "Vocês só estão empilhando os tijolos desorganizadamente. Não deviam estar construindo um prédio?"

"Com certeza, querida. E estamos", respondeu o mestre-de-obras. "É bem verdade que as

flutuações aleatórias ainda são grandes o bastante para esconder o padrão, mas assim que tivermos estabelecido a distribuição de probabilidades para o resultado que precisamos, estaremos conseguindo, não há o que temer."

Alice achou aquela demonstração de otimismo não muito convincente, mas ficou quieta e observou a chuva de tijolos que continuava a cair no terreno. Pouco a pouco, para sua surpresa, notou que alguns tijolos caíam mais em certas regiões do que em outras e que era possível distinguir paredes e vãos de portas. Ela olhava fascinada enquanto reconhecia as formas dos cômodos que iam surgindo daquele caos inicial. "Puxa, que impressionante!", disse. "Como conseguem fazer isso?"

"Ora, já não disse a você?", sorriu o mestre-de-obras. "Você nos viu estabelecer a distribuição de probabilidades antes de começarmos. É ela que especifica os lugares onde deve haver tijolos e onde não deve. Precisamos fazer isso antes de começar a deitar os tijolos porque não sabemos onde eles vão parar quando os jogarmos, entende?", continuou.

"Não vejo por quê!", interrompeu Alice. "Estou acostumada a ver os tijolos serem postos um depois do outro, em linhas certas."

"Bem, não é assim que fazemos aqui em Quantum. Aqui não podemos controlar onde cada tijolo vai, apenas a probabilidade de que irá para um lugar ou outro. Isto quer dizer que quando há poucos tijolos, eles podem cair em quase todos os lugares e então não parecem ter nenhum tipo de padrão. Quando seu número aumenta, porém, você descobre que só há tijolos onde há alguma possibilidade de que eles estejam lá; e onde a probabilidade é maior, é onde haverá mais tijolos. Quando se lida com grandes quantidades de tijolos, tudo acaba FUNCIONANDO muito bem, é verdade."

Alice achou tudo isso muito esquisito, apesar de o mestre-de-obras falar com tanta precisão que até parecia fazer algum sentido. Não perguntou mais nada, pois as respostas dele apenas a confundiam mais. Agradeceu então pelas informações e continuou andando pela rua.

A teoria quântica descreve o comportamento de partículas em termos de distribuições de probabilidade, e a observação real de partículas individuais ocorre aleatoriamente dentro destas distribuições. As probabilidades podem incluir processos classicamente proibidos, tais como a penetração de partículas através de uma estreita barreira de energia.

Não muito tempo depois, ela avistou uma janela onde um grande cartaz dizia:

Insatisfeito com seu estado?
Gostaria de passar para um nível mais alto?
Ajudaremos você a fazer a transição por apenas 10 eV.
(Oferta sujeita à limitação usual da exclusão de Pauli).

"Tenho certeza de que deve ser alguma coisa muito excitante, mas não tenho ideia do que se trata, e se fosse perguntar a alguém, estou certa de que a resposta me deixaria ainda mais perdida do que estou agora", exclamou Alice desesperada. "Não entendi nada do que vi até agora. Queria encontrar alguém que me desse uma boa explicação sobre o que está acontecendo em volta de mim."

Não tinha percebido que havia falado alto até ouvir a resposta dada por um passante. "Se quiser entender o País do Quantum, vai precisar de alguém que lhe explique a mecânica quântica. Para isso, você deveria ir ao Instituto de Mecânica", aconselharam-na.

"Oh, serão eles capazes de me explicar o que está acontecendo aqui?", gritou Alice satisfeitiíssima. "E serão capazes de me explicar todas as coisas que vi, assim como o cartaz naquela janela e o que quer dizer aquele 'eV'?"

"Acho que a Mecânica poderá lhe explicar a maior parte", respondeu seu informante, "mas como eV são unidades de energia, provavelmente você deveria começar perguntando sobre elas no Banco Heisenberg, principalmente porque fica ali do outro lado da rua."

Alice olhou para onde ele apontava e viu uma grande construção com uma fachada muito

pomposa, obviamente construída para impressionar. Tinha uma entrada com pilastras de pedra e, no topo, em letras garrafais, estava gravado o nome BANCO HEISENBERG. Alice atravessou a rua, subiu a longa escadaria que levava à porta grandiosa, e entrou.

2

O BANCO HEISENBERG

Passando pela porta, Alice se viu numa sala com colunas altas e paredes de mármore. Era igualzinho a outras casas bancárias que ela havia conhecido, só que este parecia mais com um Banco. Havia uma fileira de caixas ao longo da parede, e o amplo salão estava dividido por barreiras de fita para que os clientes já fossem formando filas enquanto esperavam para ser atendidos. No momento, porém, não havia cliente algum. Além dos caixas atrás do balcão e o guarda de pé ao lado da porta, Alice não via mais ninguém.

Como tinham lhe aconselhado a pedir informações no Banco, ela começou a andar com decisão em direção à fileira de caixas. "Um momento!", disse o guarda. "Aonde pensa que está indo, mocinha? Não vê que há uma fila?"

"Desculpe", respondeu Alice, "mas não estou mesmo vendo a fila. Não há ninguém aqui."

"Claro que há, e muitos!", enfatizou o guarda. "Estamos recebendo muitos 'ninguéns' hoje. Normalmente nós nos referimos a eles como virtuais. Poucas vezes vi tantas partículas virtuais esperando por seus empréstimos de energia."

Alice percebeu — e isto estava se tornando comum — que nada ia ser rapidamente esclarecido. Olhou para as janelinhas dos caixas e viu que, apesar de o Banco parecer estar vazio, os caixas estavam muito ocupados. Figuras brilhantes iam aparecendo, uma de cada vez, na frente de uma janelinha ou outra, e depois saíam correndo do Banco. Num momento, ela viu um par de figuras se materializarem juntas em frente ao caixa. Percebeu que uma delas era um elétron; a outra era muito parecida, mas era meio como o negativo de uma fotografia da primeira, o oposto em cada detalhe dos elétrons que ela tinha visto antes.

"Aquele é um pósitron, um antielétron", murmurou uma voz no ouvido da Alice. Ela se virou e viu uma jovem mulher de olhar severo e muito bem vestida. "Quem é você?", perguntou Alice.

"Sou a Gerente do Banco", respondeu a jovem. "Sou a encarregada da distribuição dos empréstimos de energia para as partículas virtuais. A maioria é de fótons, como pode ver, mas às vezes atendemos pares de partículas e antipartículas, que chegam juntas para pedir um empréstimo, como aquele par de elétron e pósitron que você viu há pouco."

"Por que é que precisam de empréstimos de energia?", perguntou Alice. "E por que não consigo vê-los até antes de conseguirem o empréstimo?"

"Bem, vejamos", respondeu a Gerente, "para que uma partícula exista adequadamente, para que seja livre, possa se movimentar e ser observada normalmente e tudo o mais, ela deve ter ao menos uma energia mínima específica a que chamamos de energia da massa de repouso. Essas pobres partículas virtuais não têm nem mesmo essa energia. A maioria não tem nenhuma energia e por isso nem existe de verdade. Para sorte delas, podem fazer um empréstimo de energia aqui no Banco e isto permite que existam por algum tempo." Ela apontou para um cartaz na parede que dizia:

CONDIÇÕES DE EMPRÉSTIMO

$$\Delta E \Delta t = \hbar / 2$$

Dá-se preferência a pagamento imediato.

"Isto é o que chamamos de relação de Heisenberg. Ela governa todas as nossas transações.

O $\hbar$ é chamado constante de Planck, o valor corretamente reduzido, é claro. A relação $\Delta E \Delta t$ dá a taxa de câmbio para nossos empréstimos de energia. A quantidade ΔE é a quantidade de energia emprestada e Δt é o intervalo de tempo para o qual o empréstimo vale."

"Quer dizer", disse Alice, tentando acompanhar o que a Gerente dizia, "que é como a taxa de câmbio entre duas moedas diferentes, de modo que quanto mais tempo houver, mais energia pode ser emprestada?".

"Oh, não! É justamente o contrário! A energia e o tempo multiplicados juntos é que dão um valor constante. Quanto maior a energia, mais curto é o período de tempo em que vale o empréstimo. Para entender direitinho, dê uma olhada naquela partícula e antipartícula exóticas que acabaram de fazer um empréstimo no caixa 7."

Alice olhou para onde a Gerente indicou e ficou impressionada. Na frente do caixa estava um par de figuras; uma era o oposto da outra, da mesma forma que o elétron e o pósitron que ela tinha visto antes. Este par, porém, era de figuras brilhantes e chamativas cuja presença ocupava tanto espaço que quase escondiam o caixa atrás delas. Alice ficou impressionada com a extravagância das duas, como não podia deixar de ser, mas quando ia abrir a boca para fazer um comentário, elas se dissiparam e desapareceram por completo.

"Aí está um exemplo do que eu estava dizendo", continuou a Gerente calmamente. "Aquele par pegou uma quantidade enorme de energia para sustentar a imensa massa de repouso necessário ao estilo de vida deles. Mas porque o empréstimo era muito alto, o prazo para pagamento era tão curto, mas tão curto, que eles nem conseguiram sair do balcão antes de pagar o empréstimo de volta. Como essas partículas pesadas não conseguem ir muito longe antes de pagarem seus empréstimos de energia, elas são conhecidas no nosso ramo como partículas de curto alcance, completou a Gerente.

"A relação entre tempo e energia é a mesma para todos, então?", perguntou Alice, sentindo que talvez tivesse finalmente conseguido descobrir alguma coisa definitiva.

A maioria das partículas tem uma massa de repouso, e isso é o equivalente a uma quantidade grande de energia. Partículas virtuais sem energia inicial podem existir por um breve período "pegando emprestada" a energia de que precisam para sua massa de repouso como uma flutuação quântica.

"Exatamente"! A constante de Planck é sempre a mesma, independente do momento e do lugar em que é aplicada. E a chamada constante universal, que significa simplesmente que ela será a mesma em qualquer lugar.

"Nós trabalhamos com energia aqui no Banco", continuou a Gerente, "porque aqui no País do Quantum, energia funciona como se fosse dinheiro. Assim como você dá nomes como reais ou dólares ao seu dinheiro, nós chamamos a unidade de energia mais usada aqui de eV. A quantidade de energia de uma partícula é o que determina aquilo que ela é capaz de fazer. A velocidade em que pode ir, o estado que pode ocupar, o quanto ela afetará outros sistemas, tudo isso depende da energia que a partícula possui.

"Nem todas as partículas são completamente destituídas de energia, como estas que estão na fila. Muitas delas têm suficiente energia própria e, nesse caso, conseguem mantê-la pelo tempo

que quiserem. São elas que você deve ter visto andando lá fora. Toda partícula que necessita de uma massa, precisa ter energia suficiente para sustentar sua existência."

Ela apontou para outro aviso emoldurado na parede, que dizia:

Massa é Energia. Energia é Massa

"Se uma partícula quiser possuir massa, ela deve achar energia para sustentar essa massa. Se sobrar alguma energia, ela poderá ser usada para outras coisas. Nem todas as partículas se importam com massa. Há algumas "free-and- easy", partículas boêmias que não têm qualquer massa de repouso. Elas não são limitadas como a maioria, que precisa se virar para conseguir sua massa e por isso podem fazer uso até mesmo de pequenas quantidades de energia. Fótons são um bom exemplo. Um fóton não tem massa de repouso. Por isso, um fóton em repouso não pesa absolutamente nada. Mas veja bem, fótons não são encontrados em repouso, normalmente; eles estão sempre correndo por aí, à velocidade da luz, pois é deles que a luz é feita, entendeu? A luz não é um fluxo constante e suave. Ela é feita de um monte de quanta, pequenos pacotes de energia, o que faz com que o fluxo seja granulado. Esses quanta, ou partículas de luz, são chamados fótons. Quase tudo é feito de quanta de algum tamanho. É daí que vem o nome da física quântica. Veja todos esses fótons saindo do Banco agora. Os fótons são todos basicamente o mesmo, exatamente um como o outro, assim como os elétrons também são o mesmo, mas você pode notar que muitos deles são bem diferentes. Isso é porque eles possuem diferentes quantidades de energia. Alguns têm muito pouca energia, como aqueles fótons de radiofrequência que estão saindo agora."

Alice olhou para uma multidão de fótons que passava por ela, fluindo em volta de seus pés e saindo pela porta. Enquanto saíam, ela ouviu fragmentos de música, vozes empostadas e alguma coisa sobre "almoçar numa quinta-feira". "Eu não sabia que ondas de rádio eram feitas de fótons", confessou Alice. "Oh, sim. Elas são. Elas são fótons com um comprimento de onda bem grande, de baixa frequência e bem pouca energia. Elas andam em grupos, pois para terem efeitos perceptíveis é preciso um monte de uma vez. São figurinhas muito simpáticas, não são?", sorriu a companheira de Alice. "Já os fótons visíveis, aqueles que fazem a luz que as pessoas usam para enxergar, têm uma frequência maior e mais energia. O efeito de um deles pode ser bem perceptível. Os mais abastados, os grandes gastadores, são as ondas de raios X e os fótons gama. Cada um deles transporta muita energia e consegue fazer com que sua presença seja notada no ambiente, se decidirem interagir."

"Isso tudo é muito interessante", disse Alice, quase sincera, "mas eu ainda estou confusa quanto à própria ideia de energia. Poderia me dizer o que realmente é a energia"?

"Muito sensata a sua pergunta", respondeu a Gerente, satisfeita. "Infelizmente, não é fácil respondê-la. Venha para o meu escritório e eu tentarei lhe dar uma explicação."

A Gerente atravessou o salão, puxando Alice com rapidez até uma discreta, mas intimidante porta no canto oposto, que levava a um escritório grande e moderno. Fazendo um sinal para que Alice se sentasse em uma confortável poltrona na frente de uma mesa larga, a Gerente deu a volta e se sentou em uma cadeira, do outro lado da mesa.

"Bem", começou ela, "energia é um pouco como o dinheiro no seu mundo, e isso também não é muito fácil de explicar com exatidão."

"Eu achei que fosse fácil", respondeu Alice. "Dinheiro é feito de moedas, como os meus trocados, ou pode ser de notas, também."

"Isso é papel-moeda, que certamente é uma forma de dinheiro". Mas o dinheiro não precisa estar em moedas e notas. Pode estar também numa caderneta de poupança, por exemplo, ou em ações de companhias, ou mesmo investido em construções. E como a energia, que pode assumir várias formas, muito diferentes umas das outras.

"A forma mais óbvia é a energia cinética", disse a Gerente, enquanto se ajeitava na cadeira. Sua voz tinha o tom complacente de quem se prepara para fazer uma longa palestra para uma plateia cativa.

"Uma partícula, ou qualquer objeto, terá energia cinética se estiver se movendo. Cinética significa movimento. Há outras formas de energia, também. Há a energia potencial, tal como a energia gravitacional de uma pedra que esteja em cima de um morro e que por isso pode rolar para baixo. Há também a energia elétrica, ou a energia química, que é a energia potencial que os elétrons têm quando estão dentro de átomos. Há, como eu disse, a energia da massa de repouso, que muitas partículas precisam ter apenas para existir, para assim terem alguma massa. Uma forma de energia pode ser convertida em outra, assim como você deposita papel-moeda na sua caderneta de poupança. Posso dar um exemplo, se você olhar pela janela." Ela se inclinou e apertou um botão em sua mesa, e uma janela redonda se abriu na parede em frente a Alice. Através dela, Alice pôde ver uma montanha-russa. Enquanto olhava, um carrinho chegou ao topo de uma das subidas, fazendo uma pequena pausa antes de descer pelo outro lado.

"Aquele carrinho, como você está vendo, não está em movimento agora e por isso tem energia cinética nula. Mas ele está no alto, e sua posição lhe confere energia potencial. Quando começa a descer, ele perde altura e por isso perde também um pouco de sua energia potencial, que é convertida em energia cinética. E isso que o faz ir mais e mais rápido enquanto desce." Alice mal podia ouvir os excitados gritos de alegria dos passageiros do carrinho disparando sobre os trilhos.

Energia existe em muitas formas. Ela pode se manifestar como a energia da massa de repouso de uma partícula, como a energia cinética que está envolvida no movimento de qualquer objeto e como os vários tipos de energia potencial. Uma forma de energia potencial é a energia gravitacional potencial de um objeto, que diminui à medida que o objeto cai.

"Se os trilhos fossem bem lisos e as rodas corressem sem fricção", continuou a desinteressada palestrante, "o carrinho voltaria ao repouso somente quando estivesse exatamente na mesma altura de onde partiu." Ela se inclinou de novo para mexer em alguma coisa na mesa. As distantes figuras na montanha-russa gritaram de surpresa quando viram que a subida seguinte diante deles adquirira subitamente uma altura bem maior. O carrinho diminuiu de velocidade até parar completamente antes de chegar ao topo. "Como foi que você fez isso?", Alice exclamou, espantada. "Nunca subestime a influência de um Banco", murmurou sua companheira. "Vamos ver o que acontece agora."

O carrinho começou a andar para trás nos trilhos em meio a gritos ainda excitados, mas não tão felizes quanto da última vez. A velocidade foi aumentando até o carrinho passar em disparada pelo ponto mais baixo e começar a subir o outro lado, diminuindo de velocidade. Ele foi parar justamente onde Alice o tinha visto pela primeira vez e aí começou a descer de novo.

"Assim ele continuaria indefinidamente, com a energia do carrinho mudando de energia potencial para energia cinética, e vice-versa, mas acho que você entendeu." A Gerente apertou outro botão na mesa e a janela se fechou.

"Este é o tipo de olhar óbvio com que se vê a energia no Mundo Clássico". Ela muda de forma de maneira contínua e suave. Você viu como o carrinho aumentou de velocidade progressivamente enquanto descia, sem grandes saltos. E não há nenhuma restrição óbvia sobre a quantidade de energia que qualquer objeto pode ter. Aqui no País do Quantum, não é

assim que acontece frequentemente. Em muitas situações, uma partícula só pode ter um conjunto restrito de valores de energia e só pode aceitar ou rejeitar energia em pacotes, que nós chamamos de quanta. No Mundo Clássico, todos os pagamentos de energia são feitos a prestação, com várias parcelas muito frequentes e bem pequeninhas infinitesimais mesmo, mas aqui é normal que sejam feitos em parcelas com determinado valor.

Na teoria quântica, considerar energia e momentum é tão importante quanto considerar posição e tempo. Mais importante, na verdade, pois é mais fácil medir a energia de um átomo do que determinar onde ele está. Energia é, em um certo sentido, o equivalente do dinheiro no mundo físico. Energia é definida classicamente como "a capacidade de realizar trabalho". É necessário às partículas ter energia, se quiserem fazer alguma coisa, isto é, fazer transições de um estado a outro. Momentum é uma quantidade mais parecida com velocidade. É estar indo em uma determinada direção, enquanto energia é só uma grandeza sem direção associada. Quando se diz o quanto de energia existe, não resta mais nada a se dizer. Elétrons, se movendo da direita para a esquerda e da esquerda para a direita à mesma velocidade, têm a mesma energia cinética, mas momenta opostos.

“Como você viu, a energia cinética é um tipo de energia teatral e espetacular — algo que os corpos só têm quando estão em movimento”. Quanto mais massa tiver o corpo, mais energia cinética ele terá, e quanto mais rápido se mover, mais energia cinética terá, sem que a quantidade dependa de forma alguma da direção em que o corpo se move, apenas da velocidade. Neste sentido, há uma diferença em relação a outra quantidade muito importante que nos diz como uma partícula se move. É algo a que chamamos momentum ou quantidade de movimento. O momentum é como a medida da obstinação de uma partícula. Toda partícula está determinada a continuar a se mover exatamente da mesma maneira como se movia antes, sem nenhuma alteração. Se alguma coisa se move com rapidez, é preciso uma determinada força para torná-la mais lenta. Uma força é também necessária para alterar a direção do movimento, mesmo se a rapidez da partícula continuar a mesma. Uma mudança só na direção do movimento não faz com que a partícula perca sua preciosa energia cinética, já que isso depende apenas da

rapidez do movimento e não de sua direção. Ainda assim, a partícula resiste a essa mudança pois isso implica na alteração de seu momentum. Partículas são muito conservadoras nesse sentido.

"É tudo uma questão do que chamamos de parâmetro, continuou a Gerente entusiasmada. "Ao se descrever uma partícula, temos de usar os parâmetros corretos. Se quiser dizer onde ela está, você deverá falar de sua posição e tempo, por exemplo."

"Achei que só fosse preciso dizer em que posição ela está", objetou Alice. "Isso dirá onde ela está não dirá?"

"Certamente que não. Você precisa do tempo, tanto quanto da posição. Se quiser saber onde um objeto está agora, ou onde estará amanhã, não adianta nada eu lhe dizer sua posição se é onde ele estava há uma semana. Você precisa saber o tempo e a posição, porque as coisas tendem a se movimentar, sabia?" Assim como se quiser saber o que uma partícula está fazendo, você deve descrever isso em termos de seu momentum e energia. Geralmente, é preciso ter a posição e o tempo se quiser saber onde uma partícula está."

"Aqui no País do Quantum, os parâmetros tendem a estar relacionados. Quando você tenta ver onde algo está, isso afeta o momentum deste objeto, quão rápido ele está se movendo. É outra forma da relação de Heisenberg que eu mostrei para você no Banco."

Há muitos tipos de energia. A energia cinética deve-se diretamente ao movimento. Uma bala de canhão em movimento tem uma energia que uma bala parada não tem. Energia da massa de repouso é outro tipo. A energia da massa de repouso de qualquer objeto é grande. Na mecânica newtoniana não havia necessidade de se considerar a energia da massa de repouso que, por não se alterar, não afetava as transferências de energia. Nos processos quânticos, as massas das partículas mudam frequentemente e a variação na energia da, massa de repouso pode ser liberada para outras formas. Uma conversão de menos de um por cento da massa de repouso para uma pequena parte do material ocorre nas armas nucleares, por exemplo. Não é uma variação de energia muito grande em comparação com outros processos investigados na física de partículas, mas é devastadora quando liberada por um número significativo de partículas dentro do nosso mundo cotidiano.

"É por isso, então", disse Alice, lembrando-se de um encontro anterior, "que o elétron com quem estive mais cedo não podia parar para que eu pudesse vê-lo sem ficar todo difuso"?

"Sem dúvida. As relações de incerteza afetam a todas as partículas desse modo. Elas sempre parecem algo indefinidas e é impossível localizá-las com precisão.

"Já sei o que vou fazer! Chamarei o Contador de Incertezas para lhe explicar isso", exclamou a Gerente. "O trabalho dele é fazer o balanço das contas. Por isso, ele tem de se preocupar o tempo todo com as flutuações quânticas." Ela estendeu um dedo elegante para apertar mais um botão entre os muitos que guarneciam sua mesa.

Houve uma breve pausa e, então, uma das portas espalhadas ao longo da parede da sala se abriu e uma figura entrou. Parecia muito um desenho do milionário pão-duro de uma edição ilustrada de "Um Conto de Natal", a não ser por sua expressão entretida e um incontrolável tique nervoso. Carregava um enorme livro-caixa que parecia inchar, agitando-se como se seu conteúdo estivesse em constante movimento.

"Acho que consegui", ele gritou, triunfante, tremendo tanto que quase deixou o livro cair. "Fechei o balanço das contas! Exceto as flutuações quânticas residuais, é claro", acrescentou, menos entusiasmado.

"Muito bom", respondeu a Gerente, distraída. "Agora eu gostaria que você levasse esta menina aqui, a Alice, e lhe explicasse as incertezas e as flutuações quânticas na energia de um sistema, essas coisas."

Com um aceno de adeus para Alice, a Gerente voltou à sua mesa e começou a fazer algo especialmente complicado com todos os botões que havia ali. O Contador levou Alice logo para fora, antes que mais alguma coisa acontecesse.

Torna-se conveniente falar das relações de incerteza de Heisenberg ao se descrever a estranha mescla de energia e tempo, de posição e momentum, que ocorre nos sistemas quânticos. O problema de tal descrição é que ela promove a crença de que a Natureza é, no fundo, incerta, que nada pode ser confiavelmente previsto e que, de fato, vale qualquer coisa. Isto não é verdade!

Eles chegaram a um escritório muito menor e muito mais entulhado, com uma escrivaninha alta e antiga, coberta de livros-caixa e pedaços de papel empilhados sobre o chão. Alice olhou um dos livros-caixa que estava aberto. A página estava cheia de colunas de números, assim como outros livros-caixa que ela já tinha visto, a não ser pelo fato de que nestes livros os números ficavam mudando, em pequenas quantidades mas sem parar, quando ela olhava para eles.

"Certo!", disse a figura meio vitoriana na frente de Alice. "Quer saber sobre a Incerteza, não é isso, mocinha?"

"Por favor, se não der muito trabalho", Alice respondeu educadamente.

"Bem", ele começou, sentando-se à mesa e cruzando os dedos como os juízes fazem para aumentar a dignidade de sua aparência. O que não foi uma boa ideia, pois nesta hora ele passou a tremer tão violentamente, que os dedos ficaram presos uns nos outros e ele teve de parar para desembaraçá-los.

"Bem", repetiu, metendo as mão nos bolsos com força, por segurança. Você não deve

esquecer nunca que a energia se conserva, o que quer dizer que sempre há a mesma quantidade de energia. Ela pode ser convertida de uma forma a outra, mas a quantidade total é sempre a mesma. Pelo menos quando se pensa a longo prazo", ele acrescentou melancolicamente e suspirou, olhando para longe com pesar.

"Não é verdade, a curto prazo, então?", perguntou Alice, sentindo que devia dizer algo para continuar com a conversa.

"Não. Não totalmente. Na verdade, não mesmo, se o prazo for bem curto. Você viu a relação de Heisenberg no cartaz do lado de fora do Banco, não viu?"

"Ah, sim, Me disseram que ela ditava os termos dos empréstimos de energia."

"De certa forma, é o que ela faz. Mas de onde você acha que vem a energia para os empréstimos?"

"Do Banco, é claro."

"Oh, meu Deus, não!", disse o contador, levemente horrorizado. "Com toda certeza, não! Seria muito bom se o Banco começasse a emprestar energia de seu estoque próprio!"

"Não", continuou, num tom de conspiração, olhando em volta com atenção, "Não é todo mundo que sabe, mas a energia não vem do Banco. Na verdade, ela não vem de nenhum lugar. Ela é uma flutuação quântica. A quantidade de energia que um determinado sistema possui não é absolutamente definida, mas oscila para mais e para menos, e quanto menor o período de tempo em que nós a examinamos, maior será sua variação.

"Neste sentido, energia não é como o dinheiro. O dinheiro conserva-se bem a curto prazo. Se quiser dinheiro para alguma coisa, tem de consegui-lo em algum lugar, não é mesmo? Pode sacar de uma conta bancária ou pedir emprestado a alguém, ou até roubar!"

"Eu não faria isso!", gritou Alice indignada, mas o Contador continuou, imperturbável.

"Não importa onde o conseguiu, ele tem de vir de algum lugar. Se você consegue mais, é porque outra pessoa tem menos. É isso que acontece a curto prazo imediato, a qualquer taxa.

"A longo prazo é diferente; é possível que haja inflação e você descubra que há muito dinheiro circulando. Todos têm mais, mas o dinheiro não parece poder comprar tanto quanto antes. Energia é o oposto. A longo prazo ela se conserva, a quantidade total continua a mesma, e não há

nada parecido com a inflação econômica. Todo ano você vai precisar, em média, da mesma quantidade de energia para se transferir de um estado para o outro em um átomo. A curto prazo, por outro lado, a energia não se conserva bem. Uma partícula pode colher a energia de que precisa sem que ela tenha de vir de algum lugar; ela simplesmente aparece como flutuação quântica. Essas flutuações são consequência da relação de incerteza: a quantidade de energia que se tem é incerta e quanto menor o tempo que você a possuir, mais incerta a quantidade será."

"Isso me parece terrivelmente confuso", disse Alice.

"Nem precisa dizer!", respondeu enfaticamente seu acompanhante. "É mesmo! Você gostaria de ser contador quando os números nos seus livros estão flutuando sem parar?"

"Deve ser horrível", disse ela em solidariedade. "Como é que você consegue?"

"Normalmente, eu tento demorar o máximo possível quando estou fazendo o balanço das contas. Isso ajuda um pouco. Quanto maior for o período de tempo que eu gasto, menores as flutuações residuais, entende? Infelizmente, as pessoas ficam impacientes e vêm me perguntar se estou planejando ficar calculando o balanço para sempre. Esta seria a única maneira de se fazer isso", continuou ele, com honestidade. "Quanto mais tempo eu levar, menores serão as flutuações de energia. Se eu ficasse fazendo isso para sempre, não haveria nenhuma flutuação e minhas contas teriam um balanço perfeito", disse, triunfante. "Infelizmente, não me deixam em paz. Todos estão impacientes e ansiosos para fazer transições de um estado para outro, o tempo todo."

"Há mais uma pergunta que eu gostaria de fazer", Alice lembrou-se. "O que são esses estados de que tanto ouço falar? Poderia explicá-los para mim, por favor?"

"Não sou a melhor pessoa para isso. Como é tudo parte da Mecânica Quântica, você deveria ir ao Instituto de Mecânica e perguntar por lá."

"Foi o que me disseram antes", disse Alice. "Já que esse é o lugar onde devo perguntar, poderia me dizer como chego lá?"

Energia pode ser transferida de uma forma para outra, mas a energia total de um sistema é constante (contanto que não haja troca de energia com a vizinhança). Isto é uma verdade absoluta na mecânica clássica. É verdade a longo prazo em sistemas quânticos, mas, a curto prazo, o valor da energia está sujeito a flutuações. A palavra flutuação é melhor do que a palavra incerteza, uma vez que há consequências físicas reais. A penetração em barreiras durante o

decaimento alfa de núcleos é um dos casos; falaremos de decaimento alfa no Capítulo 8 e já vimos a penetração de barreiras no Capítulo 1.

"Receio não poder dizer-lhe realmente como chegar lá. Não é assim que fazemos as coisas aqui. Mas posso conseguir que seja muito provável que você chegue lá."

Ele se virou e foi até o outro lado do seu escritório, até uma parede coberta com uma cortina empoeirada. Ao puxá-la bruscamente ele revelou a Alice uma fila de portas ao longo da parede. "Aonde leva cada uma delas?", ela perguntou. "Alguma delas leva ao Instituto de que você estava falando?"

"Cada uma delas poderia levá-la a quase qualquer lugar, incluindo, é claro, o Instituto. Mas a questão é que todas elas muito provavelmente a levam à porta do Instituto."

"Não compreendo", reclamou Alice, com um sentimento de confusão crescente que já estava se tornando familiar. "Qual é a diferença? Dizer que cada uma delas leva a quase qualquer lugar é a mesma coisa que dizer que todas elas podem levar a quase qualquer lugar."

"De jeito nenhum! É completamente diferente. Se você passar por qualquer uma delas, você vai acabar chegando em quase qualquer lugar, mas se passar por todas ao mesmo tempo, provavelmente vai chegar onde quer chegar, no pico do padrão de interferência."

"Que bobagem!", ela exclamou. "Não há como passar por todas as portas de uma só vez. Só é possível passar por uma porta de cada vez."

"Ah, isso é diferente! Claro, se eu vejo você passando por uma porta, você então passará por essa porta, mas se eu não a vir, é bem possível que você tenha passado por qualquer uma das portas. Neste caso, a regra geral se aplica."

Com um gesto, ele indicou um cartaz grande e chamativo, pregado na parede em frente à mesa, onde era impossível não ser visto. O cartaz dizia:

AQUILO QUE NÃO É PROIBIDO É COMPULSÓRIO!

"Esta é uma das regras mais básicas que temos aqui. Se é possível fazer várias coisas juntas, você não faz só uma, deve fazê-las todas. Assim, você evita ter de tomar decisões o tempo todo. Então vá, passe por todas as portas e ao fazer isso saia em todas as direções de uma só vez. Você vai ver que é muito fácil e logo chegará ao lugar certo."

"Isso é ridículo!", Alice protestou. "Não há maneira de passar por várias portas ao mesmo tempo!"

"Como pode dizer isso antes de tentar? Nunca fez duas coisas ao mesmo tempo?"

"Claro que sim", ela respondeu. "Já assisti televisão enquanto fazia meu dever de casa, mas isso não é a mesma coisa. Eu nunca fui em duas direções ao mesmo tempo."

"Sugiro que você experimente", respondeu o Contador, irritado. "Você nunca vai saber se pode fazer alguma coisa se não tentar. Este é o tipo de pessimismo que sempre atravanca o progresso. Se quiser ir a algum lugar aqui, você tem de fazer tudo que é possível, e tudo ao mesmo tempo. Não precisa se preocupar com onde você vai parar. A interferência cuida disso!"

"O que quer dizer? O que é interferência?", ela perguntou.

"Não há tempo para explicar. No Instituto de Mecânica vão lhe dizer isso. Agora vá, e eles lhe explicarão quando você chegar."

"Isso é horrível!", pensou Alice consigo mesma. "Todas as pessoas com quem falo me mandam apressadas para outro lugar, prometendo explicações quando eu chegar lá. Gostaria que alguém me explicasse tudo direito, de uma vez por todas! Tenho certeza de que não sei como posso ir em várias direções ao mesmo tempo. Parece impossível, mas ele está tão certo de que conseguirei, que acho que é melhor eu tentar."

Alice abriu uma porta e entrou.

OS MUITOS CAMINHOS DE ALICE:

Alice entrou pela porta da esquerda e se viu numa pequena praça de paralelepípedos com três becos estreitos que saíam dela. Escolheu o beco da esquerda. Antes que pudesse ir muito longe, chegou a uma ampla área pavimentada. No centro dela erguia-se um alto e escuro edifício, sem janelas nos andares mais baixos. Era ameaçador.

Alice entrou pela porta da esquerda e se viu numa pequena praça de paralelepípedos com três becos estreitos que saíam dela. Escolheu o beco da direita. Antes que pudesse ir muito longe, chegou a um parque com caminhos de pedra cobertos por ervas, que seguiam por entre árvores que pendiam melancólicas. Altas grades de ferro cercavam o parque e uma névoa úmida escurecia o

panorama do lado de dentro.

Alice entrou pela porta da esquerda e se viu numa pequena praça de paralelepípedos com três becos estreitos que saíam dela. Escolheu o beco do meio. Antes que pudesse ir muito longe, chegou a outra pracinha, em frente a um prédio de aparência muito pobre.

Alice entrou pela porta da direita e se viu num beco estreito de onde saíam outros dois. Escolheu o beco da esquerda. Antes que pudesse ir muito longe, chegou a uma ampla área pavimentada. No centro dela erguia-se um alto e escuro edifício, sem janelas nos andares mais baixos. Era ameaçador e ela teve a clara impressão de que não deveria estar ali.

Alice entrou pela porta da direita e se viu num beco estreito de onde saíam outros dois. Escolheu o beco da direita. Antes que pudesse ir muito longe, chegou a um parque com caminhos de pedra cobertos por ervas, que seguiam por entre árvores que pendiam melancólicas. Altas grades de ferro cercavam o parque e uma névoa úmida escurecia o panorama do lado de dentro. Ela teve a clara impressão de que não deveria estar ali.

Alice entrou pela porta da direita e se viu num beco estreito de onde saíam outros dois. Escolheu o do meio. Antes que pudesse ir muito longe, chegou a outra pracinha, em frente a um prédio de aparência muito pobre. De certa forma, pareceu-lhe que este era o lugar certo para ela estar.

Alice entrou pela porta do meio e se viu de frente para uma parede com três passagens em arco que levavam a becos um pouco mais além. Escolheu o beco da esquerda. Antes que pudesse ir muito longe, chegou a uma ampla área pavimentada. No centro dela erguia-se um alto e escuro edifício, sem janelas nos andares mais baixos. Era ameaçador e desta vez a impressão de que não deveria estar ali era muito forte.

Alice entrou pela porta do meio e se viu de frente para uma parede com três passagens em arco que levavam a becos um pouco mais além. Ela não seguiu pelo beco da direita, pois este caminho de algum jeito parecia ser completamente errado.

Alice entrou pela porta do meio e se viu de frente para uma parede com três passagens em arco que levavam a becos um pouco mais além. Escolheu o beco do meio. Antes que pudesse ir muito longe, chegou a outra pracinha, em frente a um prédio de aparência muito pobre. Ela agora tinha certeza de que este era o lugar onde deveria estar.

Alice observou o prédio mais de perto. Num cartaz desbotado junto à porta ela conseguiu ler as palavras "Instituto de Mecânica". Era ali mesmo que ela queria chegar!

Partículas que podem tomar diferentes caminhos existem como uma superposição (soma) de amplitudes. Cada caminho possível contribui com uma amplitude, ou opção, para o comportamento da partícula e todas as amplitudes estão presentes, juntas. As diferentes amplitudes podem interferir, combinando-se e se concentrando em certas regiões para aumentar a probabilidade de se encontrarem partículas ali. Em outros lugares, podem se cancelar mutuamente para diminuir a probabilidade de se encontrar partículas. Amplitude e interferência serão discutidas no próximo capítulo.

3

O Instituto de Mecânica

Alice examinou o prédio que estava à sua frente. Era uma modesta estrutura de tijolos, já meio castigada pelo tempo. Na frente, havia um cartaz que dizia se tratar do "Instituto de Mecânica". Ao lado do cartaz havia uma porta, em que alguém tinha pregado um aviso: "Não bata. Apenas entre." Alice experimentou e viu que a porta não estava trancada. Abriu-a e entrou.

Do outro lado da porta havia uma sala ampla e escura. No meio da sala havia uma área

iluminada e clara. Dentro desta limitada região era possível distinguir alguma coisa com razoável nitidez. Mais para além, jazia uma extensão aparentemente ilimitada de escuridão na qual nada significativo podia ser discernido. Na mancha de luz ela viu uma mesa de bilhar com duas figuras se movendo em volta. Alice andou em sua direção e quando se aproximou, eles se voltaram para olhar para ela. Era uma dupla bem estranha. Um era alto e angular e usava uma camisa branca engomada com colarinho duro e também alto, uma gravata estreita e, para surpresa de Alice, um macacão. Seu rosto era aquilino, e ele tinha costeletas fartas. Ele olhou para ela com tanta intensidade que Alice sentiu que ele podia perceber até mesmo o menor detalhe naquilo que observava. Seu companheiro era menor e mais jovem. Seu rosto redondo era decorado com uns óculos grandes, de armação de metal; era difícil perceber para onde ele estava, olhando, ou mesmo onde exatamente estavam seus olhos. Ele vestia um avental branco de laboratório sob o qual aparecia uma camiseta com o desenho de algo vagamente atômico na frente. Não era fácil dizer com certeza o que era, pois as cores estavam desbotadas.

"Com licença, este é o Instituto de Mecânica?" Alice perguntou, mais para puxar conversa. Pelo cartaz, ela já sabia que era.

"Sim, minha cara", disse o mais alto e impressionante dos dois. "Eu sou um Mecânico Clássico do Mundo Clássico, e estou visitando meu colega, aqui, que é um Mecânico Quântico. Qualquer que seja seu problema, tenho certeza de que um de nós poderá ajudá-la. É só esperar até que terminemos nossas jogadas."

Ambos se viraram para a mesa de bilhar. O Mecânico Clássico mirou com cuidado, considerando as ínfimas panes de todos os ângulos envolvidos. Finalmente, deu a tacada bem à vontade. A bola bateu e voltou numa impressionante série de ricochetes e acabou por entrar em colisão com a bola vermelha, que foi parar com precisão dentro de uma das caçapas. "Aí está", exclamou com satisfação ao tirar a bola de dentro do buraco. "É assim que se faz, está vendo? Observação cuidadosa e exata, seguida de ação precisa. Procedendo assim, você obtém o resultado que escolher."

Seu companheiro não respondeu, tomou seu lugar na mesa e fez um movimento vago com seu taco. Após suas experiências anteriores, Alice não ficou surpresa ao ver a bola disparar em todas as direções ao mesmo tempo, e não havia lugar na mesa onde ela pudesse dizer com certeza que a bola não havia estado, embora não pudesse dizer igualmente onde a bola havia estado. Após um intervalo, o jogador olhou dentro de uma das caçapas, enfiou a mão e tirou a bola vermelha.

"Se não se importa que eu faça uma observação", disse Alice, "parece que você joga de forma muito diferente."

"É isso mesmo", respondeu o Mecânico Clássico. "Odeio quando ele dá tacadas desse jeito. Gosto que tudo seja feito com muito cuidado e precisão e que todos os detalhes sejam planejados antecipadamente. Contudo", acrescentou, "imagino que você não tenha vindo aqui para nos ver jogar bilhar, por isso, pode nos dizer o que é que quer saber."

Alice contou novamente todas as suas experiências desde que tinha chegado ao País do Quantum e explicou como tinha achado tudo muito confuso e como tudo parecia estranho e indefinido. "Eu nem sei como encontrei este prédio", concluiu. "Me disseram que a interferência provavelmente me levaria para o lugar certo, mas não consegui entender o que aconteceu."

"Bem", disse o Mecânico Clássico, que parecia ter escolhido a si mesmo para ser o porta-voz da dupla. Eu não posso dizer que entendi tudo também. Como eu já disse, gosto das coisas claras, com a causa sendo seguida pelo efeito, com tudo muito claro e previsível. Para dizer a verdade, muitas coisas que acontecem aqui não fazem o menor sentido para mim", ele murmurou, num tom de confidencia. "Eu saí do Mundo Clássico só para dar uma voltinha. Lá é um lugar esplêndido, onde tudo acontece com precisão mecânica. A causa é seguida do efeito de uma maneira maravilhosamente previsível, o que faz com que tudo faça sentido e que você saiba o que vai acontecer. E tem mais: os trens estão sempre na hora", acrescentou. Ver nota 1 no final do Capítulo.

"Parece impressionante", disse Alice com educação. "Para ser assim tão organizado, tudo deve ser controlado por computadores."

"Não", respondeu o Mecânico Clássico. "Não usamos computador algum. Na verdade, coisas eletrônicas não funcionam no mundo clássico. Somos melhores com máquinas a vapor. Eu não me sinto muito à vontade, aqui no País do Quantum. O meu amigo aqui está muito mais familiarizado com as condições quânticas."

"Contudo", ele continuou, mais seguro de si, "eu posso lhe dizer o que é interferência. Isso acontece na mecânica clássica também. Siga-me e demonstrarei como funciona."

Ele levou Alice através de uma porta, depois por um longo corredor e para dentro de uma outra sala. Esta sala estava bem iluminada, com uma luz clara que iluminava todos os cantos da sala e que não parecia vir de nenhuma fonte específica. Eles estavam de pé numa estreita passarela de madeira, que dava a volta na sala, encostada nas paredes. O chão no meio da sala estava coberto com uma espécie de substância cinza brilhante que não parecia sólida. Flashes de luz aleatórios atravessavam este material, assim como um televisor com o canal fora do ar.

O guia explicou para Alice, "Esta é a sala de gedanken, que quer dizer 'sala de pensar'. Você deve saber que em alguns clubes existem salas de escrever e salas de ler. Bem, nós temos uma sala de pensar. Aqui, os pensamentos das pessoas tomam forma, para que todos possam vê-los. Aqui podemos fazer experimentos de pensamento, que nos permitem descobrir o que aconteceria em várias situações físicas, sendo muito mais baratos do que os experimentos de verdade, é claro.

"Como é que funciona?", perguntou Alice. "E só pensar em alguma coisa e ela aparece?"

"Correto; em essência, é só o que precisa fazer."

"Oh, por favor, posso experimentar?", Alice

perguntou. "Certamente, se quiser."

Alice pensou com intensidade na substância móvel e brilhante. Para sua surpresa e alegria, onde antes não havia nada, ela viu um grupo de coelhos peludos saltando para lá e para cá.

"Sim, muito bonito", disse o Mecânico, muito impaciente. "Mas isso não ajuda a explicar a interferência." Ele fez um gesto e todos os coelhos desapareceram, a não ser por um pequeninho que ficou, sem ser notado, num dos cantos da área.

"Interferência", ele começou, com autoridade, "é algo que acontece com as ondas. Existem vários tipos de ondas nos sistemas físicos, mas é mais simples

pensar nas ondas da água." Ele olhou com força para o chão, que, bem na frente dos olhos de Alice, se transformou num lençol d'água, com pequenas ondas percorrendo a superfície. Num dos cantos, o coelho afundou com um "plop", quando o chão debaixo dele virou água. Ele tentou sair e olhou para eles. Então ele se sacudiu, olhou com pesar para seu pelo encharcado, e sumiu.

"Agora, um pouco de ondas", continuou o Mecânico Clássico, sem prestar atenção ao infeliz coelho. Alice olhou sem vontade para o chão e uma onda veio estourando através da superfície até quebrar dramaticamente sobre uma praia, num dos lados do chão.

"Não, não é este tipo de onda que queremos. Essas ondas grandes que estouram são complicadas demais. Nós queremos aquele tipo de onda mais suave, que se espalha quando você joga uma pedra na água." Enquanto ele falava, uma série de ondas circulares começou a se espalhar, partindo do centro da água.

"Mas precisamos pensar no que chamamos de ondas planas, que se movem todas na mesma direção." As ondulações circulares se transformaram numa série de longos sulcos paralelos, como um campo arado e molhado, todas se movendo através do chão, de um lado a outro.

"Agora, poremos uma barreira no meio." Um obstáculo baixo surgiu no centro, dividindo o chão em dois. As ondas iam até a barreira e colidiam contra ela, mas não havia jeito de passarem para o outro lado, que agora estava calmo e parado.

"Fazemos um buraco na barreira agora, para que as ondas possam atravessar por ele." Uma fenda pequena, muito bem-feita, apareceu um pouco à esquerda do ponto central da barreira. Ao passar por essa brecha, as ondas se espalhavam circularmente pela calma região do outro lado da barreira.

"Agora veja o que acontece quando temos duas fendas na barreira", exclamou o Mecânico. Instantaneamente, havia uma fenda à esquerda e outra à direita do ponto central. Ondulações circulares espalhavam-se a partir de ambos. Onde elas se encontravam, Alice pôde ver que a água subia e descia muito mais do que quando havia somente uma fenda na barreira, enquanto em outros lugares ela mal se movia.

"Você vai entender quando congelarmos o movimento. É claro que é possível fazer isso num experimento pensado." O movimento na água foi interrompido e as ondulações ficaram congeladas no lugar em que estavam, como se toda a área tivesse sido abruptamente transformada em gelo.

"Vamos marcar agora as regiões de amplitude máxima e mínima", continuou, determinado, o Mecânico Clássico. "A amplitude mede o quanto a água se deslocou a partir do nível que tinha quando estava parada." Duas setas fluorescentes apareceram, flutuando no espaço por sobre a superfície. Uma tinha a cor das maçãs verdes e estava apontando para um local onde a perturbação na superfície tinha sido maior. A outra seta era de um vermelho meio pálido e apontava o local onde a superfície quase não tinha sido perturbada.

"Você poderá ver o que está acontecendo se virmos o efeito de só uma fenda de cada vez", ele disse, com um entusiasmo crescente. Uma das fendas na barreira desapareceu e só sobraram as ondulações circulares que partiam da outra fenda, ainda congeladas em suas posições como se fossem feitas de vidro. "Agora, vamos mudar para a outra fenda." Alice percebeu que a diferença era muito pequena entre um local e outro. A posição da fenda tinha se alterado e o padrão de ondulações circulares que passava por ela se moveu um pouco, mas no aspecto geral parecia o mesmo. "Temo que não consiga entender o que você está tentando me mostrar", ela disse. "Os dois casos parecem o mesmo para mim."

"Vai ser mais fácil ver a diferença se eu passar rapidamente de um caso para outro." A fenda na barreira começou a pular de um lado para outro, primeiro para a direita e depois para a esquerda. Enquanto isso acontecia, o padrão de ondulações avançava e retrocedia, primeiro para a direita, depois para a esquerda.

"Veja o padrão de ondas em baixo da seta verde", disse o Mecânico, que, aos olhos de Alice, estava mais excitado com o assunto do que deveria. Ela, porém, fez o que ele pediu e percebeu que no local indicado pela seta havia uma elevação na água, em ambos os casos. "Cada fenda na barreira produziu uma onda que se eleva neste ponto particular". Quando as duas fendas estão abertas, a onda é duas vezes mais alta aqui e a elevação e a depressão totais são muito maiores do que quando só há uma fenda. A isso chamamos de interferência construtiva.

"Agora veja o padrão das ondas em baixo da seta vermelha." Ali Alice viu que, enquanto uma fenda causava uma elevação naquele ponto, a outra produzia uma depressão. "Veja que nesta posição a onda de uma fenda sobe enquanto a onda da outra desce. Quando as duas se encontram, elas se cancelam mutuamente e, no total, a perturbação desaparece. A isso chamamos de interferência destrutiva.

"Isso é, na verdade, tudo que há para saber sobre interferência de ondas. Quando duas ondas se atravessam e se combinam, suas amplitudes, as quantidades que medem o quanto sobem ou descem, também se combinam. Em alguns lugares, as ondas participantes estão todas indo no mesmo sentido, então as perturbações se somam e o resultado final é considerável. Em outros lugares, elas vão em sentidos opostos e se cancelam mutuamente."

"Sim, acho que entendi", ela disse. "Quer dizer que as portas do Banco funcionavam como as fendas na barreira, causando um grande efeito nos lugares onde eu precisava ir e cancelando-se mutuamente em outras posições. Mas ainda não vejo como isso se aplica ao meu caso. Com suas ondas de água, você diz que há mais da onda em um lugar e menos no outro por causa desta interferência, mas a onda está espalhada por toda a região, enquanto eu estou em um só lugar de cada vez."

"Exatamente!" gritou o Mecânico Clássico triunfante. É esse o problema. Como você mesma disse, você está em um só lugar. Você é mais como uma partícula do que como uma onda, e as partículas se comportam de maneira bem diferente no sensato mundo clássico. Uma onda se espalha por uma ampla área e nós só vemos uma pequena porção dela em qualquer posição. Por causa da interferência, você pode ter mais ou menos dela em posições diferentes, mas, ainda assim, você estará olhando para apenas uma pequena parte da onda. Uma partícula, por outro lado, está localizada em algum ponto. Olhando em posições diferentes, você vê a partícula inteira ou ela simplesmente não está lá. Na Mecânica Clássica as partículas não exibem efeitos de interferência, como provaremos."

Ele virou para o chão da sala de gedanken e olhou-o com firmeza. De um espelho d'água, a superfície se transformou em uma área blindada com barreiras reforçadas ao longo do perímetro, altas o bastante para eles se protegerem atrás delas. De um lado a outro, no meio do chão, onde antes havia a barreira de ondas, erguia-se uma parede blindada com uma estreita abertura um pouco à esquerda do centro.

"Podemos ver agora o mesmo arranjo, só que fiz umas alterações para que possamos observar partículas rápidas. Elas são mais ou menos como as balas de uma arma, e é por isso mesmo que vamos usar uma."

A interferência é, classicamente, uma propriedade das ondas. Ela ocorre quando amplitudes, ou perturbações, de diferentes fontes se encontram e se combinam somando em alguns lugares e subtraindo ou cancelando em outros. Isso resulta em regiões de atividade intensa ou baixa, respectivamente. Pode-se ver esse efeito no padrão produzido quando as ondulações deixadas por dois barcos se cruzam umas com as outras. Os efeitos da interferência podem causar também a má recepção de um televisor quando as ondas refletidas por um prédio próximo interferem com o sinal direto. A interferência requer distribuições extensas e sobrepostas. Na Física Clássica, partículas ocupam uma posição determinada e não produzem interferência.

Ele fez um gesto em direção a uma das extremidades da sala onde apareceu uma metralhadora de aparência desagradável, com muitas caixas de munição empilhadas ao lado. "Esta arma não está muito bem apoiada e por isso não atira sempre na mesma direção". Algumas balas atingirão a fenda na parede e passarão para o outro lado, como parte da onda fez no nosso último experimento pensado. A maioria delas, é claro, atingirá a parede, ricocheteando. Oh, isso me faz lembrar", ele disse, de repente. "Devemos usar isso, caso alguma bala nos atinja ao ricochetear." Pegando um par de capacetes de aço, ele estendeu um para Alice.

"É mesmo necessário?", ela perguntou. "Se o experimento é só pensado, essas balas são também pensadas e não podem nos causar dano algum."

"Talvez, mas você pode pensar que foi atingida por uma bala e isso não seria muito legal."

Alice colocou o capacete. Ela não sentia o peso dele sobre sua cabeça, nem achava que ele adiantaria para alguma coisa, mas continuar discutindo também não seria muito útil. O Mecânico retesou seu corpo, acenou como se fosse um imperador e a metralhadora começou a disparar, fazendo muito barulho. As balas saíam num fluxo irregular. A maioria acertava a parede e zumbia para longe em todas as direções, mas algumas passavam pelas aberturas na barreira e chegavam à parede do outro lado. Alice ficou intrigada ao perceber que, quando uma bala atingia a parede do outro lado da barreira, ela parava imediatamente e se elevava devagar para ficar flutuando no ar bem acima do ponto onde atingira a parede.

“Como você pode ver, enquanto a onda de água se espalhava por toda a parede além da fenda, uma bala a atingirá em apenas uma posição”. Neste experimento, porém, há uma maior probabilidade da bala passar direto pela fenda do que resvalar na borda da abertura e ir parar muito para o lado. Se esperarmos um pouco mais, veremos como a probabilidade varia para os diferentes pontos ao longo da parede.” Enquanto o tempo passava e o ar ia ficando cheio de balas voadoras, o número daquelas que flutuavam perto da parede crescia com regularidade. Enquanto observava, Alice começou a distinguir um padrão que ia se formando.

“Veja, já dá para perceber como as balas que passaram pela fenda se distribuem pela parede”, disse o Mecânico quando a arma parou. “A maioria foi parar diretamente na direção da abertura, e o número vai decrescendo tanto para um lado quanto para outro. Agora veja o que acontece quando a fenda é deslocada um pouco para a direita.” Com outro gesto seu, as balas flutuantes caíram no chão e a

metralhadora recomeçou. Apesar de a demonstração ser barulhenta e bem perturbadora, Alice percebeu que o resultado final foi o mesmo que da vez anterior. Sinceramente, foi decepcionante.

"Como pode ver", disse o Mecânico com uma confiança indevida, "a distribuição é parecida com a anterior, mas levemente deslocada para a direita, uma vez que o centro agora está do outro lado da abertura." Alice não percebeu diferença nenhuma, mas estava pronta para aceitar o que ele dissesse.

"Agora", disse o Mecânico em tom teatral, "vejamos o que acontece quando ambas as fendas estão presentes." Até onde Alice pôde perceber, não fazia a menor diferença. Exceto que, com as duas fendas, mais balas passariam e atingiriam a parede. Desta vez, ela decidiu fazer um comentário. "Receio que, para mim, todas as vezes tenham sido iguais", ela disse, desculpando-se.

"Exatamente!", respondeu satisfeito o Mecânico. "Só que, como você deve ter observado, o centro da distribuição agora fica no meio, entre as fendas. Tínhamos uma distribuição para a probabilidade de as balas passarem pela fenda da esquerda e outra distribuição para as que passariam pela fenda da direita. Com as duas fendas, as balas podem passar por qualquer uma delas. A distribuição total, então, será a soma das probabilidades obtidas para cada uma das fendas, já que as balas devem passar por uma ou por outra. Elas não podem passar por ambas ao mesmo tempo", ele acrescentou, dirigindo-se ao Mecânico Quântico que acabava de entrar na sala.

"É o que você diz", respondeu o colega, mas como pode ter tanta certeza? "Veja só o que acontece quando repetimos nosso experimento de gedanken com elétrons."

Desta vez, quem fez um gesto em direção ao chão da sala foi o Mecânico Quântico. Seus gestos não eram tão decididos quanto os de seu colega, mas pareceu funcionar do mesmo jeito. A metralhadora e as paredes blindadas desapareceram. O chão voltou a ser do material brilhante que Alice tinha visto a princípio, mas a parede a que ela já tinha se acostumado ainda estava lá, atravessando o chão de lado a lado, com as duas fendas no meio. Do outro lado da sala estava uma grande tela com um brilho esverdeado. "Esta é uma tela fluorescente", murmurou o Mecânico para Alice. "Ela emite um flash de luz toda vez que um elétron a atinge, assim, podemos usá-la para detectar onde eles estão."

Do outro lado, onde antes estava a metralhadora, havia outra arma. Esta era pequenininha, parecida com uma versão reduzida daqueles canhões de onde são disparados os homens-bala nos espetáculos de circo. "O que é isso?", Alice perguntou.

"É um canhão de elétrons, é claro." Olhando com mais cuidado, Alice viu uma escadinha que levava à boca do canhão, com uma fila de elétrons esperando a sua vez de serem disparados. Eles estavam bem menores desde a última vez em que os vira. "Mas é claro", ela disse para si mesma, "estes são apenas elétrons pensados."

Ao olhar para eles, ela se surpreendeu ao vê-los acenando para ela. "Como será que eles me conhecem?", ela se perguntou. "Devem ser todos o mesmo elétron que eu conheci antes!"

"Iniciar disparos!", comandou o Mecânico Quântico, e os elétrons subiram os degraus depressa, entraram no canhão e eram disparados, num fluxo regular. Alice não conseguia vê-los atravessar a sala, mas via um clarão de luz no lugar onde cada um deles atingia a tela. Os clarões, ao se apagarem, deixavam uma estrelinha brilhante que ficava marcando o lugar onde os elétrons tinham aterrissado.

Assim como a metralhadora de antes, o canhão de elétrons continuou a disparar a corrente de elétrons e um monte de estrelinhas começou a se agrupar, começando a indicar uma distribuição reconhecível. A princípio, Alice não tinha certeza do que estava vendo, mas quando o número de estrelinhas começou a aumentar, ficou claro que sua distribuição era bem diferente daquela obtida com as pilhas de balas da experiência anterior.

Em vez de uma queda lenta e progressiva a partir de um número máximo no centro, em direção às laterais, as estrelas estavam distribuídas em bandas, com espaços negros entre elas, onde havia poucas ou nenhuma estrela. Alice percebeu que, de certa forma, esse caso era parecido com o das ondas de água, onde há regiões de alta atividade com áreas calmas intercaladas. Agora, havia regiões onde muitos elétrons tinham sido detectados, com muito poucos deles nas áreas intermediárias. Por causa disso, Alice não ficou surpresa quando o Mecânico Quântico disse, "O que você está vendo aí é o claro efeito da interferência. Com as ondas de água, tínhamos

regiões de maior e menor movimento na superfície. Aqui, cada elétron será detectado em apenas uma posição, mas a probabilidade de detectar um elétron varia de uma posição para outra. A distribuição de diferentes intensidades de onda que você viu antes foi substituída por uma distribuição de probabilidades. Com um ou dois elétrons tal distribuição não é óbvia, mas usando um monte de elétrons, você vai encontrar mais deles nas regiões de alta probabilidade. Com apenas uma abertura, veríamos que a distribuição decresceria aos poucos em direção aos lados, assim como as balas e as ondas de água se comportaram quando havia só uma fenda. Neste caso vemos que, quando há duas fendas, as amplitudes das duas interferem uma na outra, produzindo picos e depressões óbvias na distribuição de probabilidade. O comportamento dos elétrons é muito diferente do das balas do meu amigo."

"Não estou entendendo," disse Alice, e essa pareceu a única coisa que dizia na vida. "Quer dizer que há tantos elétrons que, de algum jeito, os elétrons que passam por um buraco estão interferindo com aqueles que atravessam o outro buraco?"

"Não. Não é isso que eu quero dizer. Não mesmo. Você verá agora o que acontece quando disparamos somente um elétron." Ele bateu palmas e disse "Ok, vamos fazer de novo, mas devagar, desta vez." Os elétrons entraram em ação ou, para ser mais preciso, um deles entrou no canhão e foi disparado. Os outros continuaram sentados onde estavam. Pouco depois, outro elétron subiu até a boca do canhão e foi disparado também. Continuaram assim por algum tempo, até que Alice começou a perceber o mesmo padrão de agrupamentos e intervalos vazios aparecendo. Esses agrupamentos e intervalos não eram tão claros como antes porque a baixa intensidade com que os elétrons iam chegando fazia com que não houvesse muitos deles nos agrupamentos, mas ainda assim o padrão era bem claro. "Aí está. Está vendo que o efeito da interferência funciona mesmo quando há apenas um elétron presente de cada vez? Um elétron sozinho pode exibir interferência. Ele pode atravessar ambas as aberturas e interferir consigo mesmo, por assim dizer."

<p>A evidência experimental mais forte do comportamento quântico é fornecida pelo fenômeno da interferência. Quando um resultado pode ser obtido por uma série de maneiras, há uma amplitude para cada maneira possível. Depois, se estas amplitudes são juntadas umas com as outras,</p>

podem se somar ou subtrair e a distribuição total de probabilidades mostrará máximos e mínimos distintos: bandas intensas e bandas vazias que se alternam. Na prática, esse efeito tem sido sempre observado onde se espera encontrá-lo. É uma forma de interferência que produz os diferentes conjuntos de estados de energia que ocorrem nos átomos. Apenas aqueles estados que "se adequam perfeitamente" ao potencial vão interferir positivamente para atingir um máximo elevado na probabilidade. Quaisquer outros estados se cancelariam mutuamente, e, portanto, não existem.

"Mas isso é besteira!", exclamou Alice. "Um elétron não pode atravessar as duas aberturas. Como disse o Mecânico Clássico, não faz o menor sentido." Ela foi até a barreira e a examinou mais de perto para tentar ver por onde os elétrons passavam ao atravessar a barreira. Infelizmente, a luz era muito fraca e os elétrons se moviam com tamanha rapidez que ela nunca conseguia distinguir por que abertura eles passavam. "Isso é ridículo", ela pensou. "Preciso de mais luz." Alice tinha esquecido que estava num "quarto pensante" e se surpreendeu quando um holofote fortíssimo apoiado num tripé apareceu ao lado do seu cotovelo. Ela rapidamente dirigiu o fecho de luz para as duas aberturas e ficou satisfeita ao perceber que havia um flash visível perto de uma ou outra abertura quando o elétron passava. "Consegui!", ela gritou. "Consigo ver os elétrons passarem pelas frestas e é exatamente como eu disse. Cada um deles passa por somente uma abertura."

"Aha!", respondeu empolgado o Mecânico Quântico. "Mas você viu o que aconteceu com o padrão de interferência?" Alice virou-se para olhar para a parede atrás da barreira e se espantou ao ver que agora a distribuição de estrelinhas concentrava-se ao máximo no centro e ia suavemente decaindo para os lados, exatamente como a distribuição clássica das balas. Não era justo.

"É sempre assim e não há nada que possamos fazer", disse o Mecânico Quântico, consolando-a. "Quando não há observação para saber por qual fenda os elétrons passam, ocorre a interferência entre os efeitos das duas fendas. Se você observar os elétrons, verá que, de fato, eles estão em um lugar ou outro e não em ambos mas, neste caso, eles se comportam como o esperado, isto é, como se tivessem passado por apenas uma fenda, não causando interferência. O problema é que não há

uma maneira de se observar os elétrons sem perturbá-los, como quando você põe a luz sobre eles. O simples ato de observar força os elétrons a escolher um percurso. Não importa se você anota por qual buraco cada elétron passou. Não importa se você presta atenção ou não nos buracos. Qualquer observação que pudesse lhe dizer isso, perturba os elétrons e interrompe a interferência. Os efeitos da interferência só acontecem quando não há maneira de saber por qual fenda o elétron passou. Se você sabe ou não, isso não importa.

"É assim: quando há interferência, parece que cada elétron está atravessando ambas as fendas. Se tentar averiguar, verá que cada um dos elétrons só passa por uma fenda, mas então o efeito de interferência desaparece. Não há como escapar disso!"

Alice dedicou um pouco de reflexão ao assunto. "Isso é totalmente ridículo!", concluiu.

"Certamente", respondeu o Mecânico Quântico com um sorriso satisfeito. "Totalmente ridículo, eu concordo, mas é assim que a Natureza funciona e nós temos de acompanhá-la e quer dizer complementaridade:", Alice perguntou.

"Claro. Complementaridade quer dizer que há certas coisas que não se pode saber. Não ao mesmo tempo, pelo menos."

"Não é isso que complementaridade quer dizer", ela protestou.

"Quando eu digo, é isso que quer dizer", respondeu o Mecânico. "As palavras significam aquilo, que eu quiser. É tudo uma questão de quem é o mestre. Complementaridade, é o que eu digo."

"Você já disse isso", disse Alice, sem se deixar convencer totalmente pela última afirmação do Mecânico.

"Não, não disse", respondeu o Mecânico. "Desta vez quero dizer que há perguntas que não se pode fazer a uma partícula, tais como onde ela está e a que velocidade se move. Na verdade, não significa muita coisa falar de um elétron ocupando uma determinada posição."

"Isso é muita coisa para dizer com uma só palavra!", Alice disse com ironia.

"Com certeza", respondeu o Mecânico, "mas quando faço uma palavra trabalhar horas extras como agora, eu sempre pago mais. Acho que não posso explicar o que está acontecendo de verdade com os elétrons. É normalmente exigido de uma explicação que ela faça sentido com termos e palavras que você já conhece e a física quântica não faz isso. Parece que não faz sentido, mas funciona. Dá até para dizer com segurança que ninguém entende a física quântica. Não consigo explicar para você mas posso descrever que está acontecendo. Venha para o quarto dos fundos e eu verei o que posso fazer." Ver nota 2 no final do Capítulo.

Na mecânica quântica, partículas são como ondas e ondas são como partículas. Elas são a mesma coisa. Tanto os elétrons quanto a luz exibem os efeitos da interferência, mas, quando detectados, são percebidos como quanta individuais e cada um é observado em um lugar determinado.

A interferência entre os possíveis percursos que uma partícula pode percorrer resultará em uma distribuição de probabilidades com mínimos e máximos bem pronunciados, onde é mais provável que uma partícula seja detectada em uma posição do que em outra.

Eles deixaram a sala de gedanken, cujo chão tinha voltado ao seu costumeiro aspecto brilhante, e prosseguiram por um corredor até outra sala

mobiliada com umas poucas poltronas. Quando os dois já tinham se sentado, o Mecânico continuou: "Quando falamos de uma situação como os elétrons passando pelas aberturas, nós a descrevemos usando uma amplitude. É mais ou menos como as ondas que você viu, e é de fato chamada, com frequência, de função de onda. A amplitude pode passar por duas aberturas ao mesmo tempo e não é sempre positiva, como a probabilidade. A menor probabilidade que se pode ter é zero, mas a amplitude pode ser positiva ou negativa, com os diferentes percursos podendo se anular ou somar-se uns com os outros e resultar em interferência, como ocorre com as ondas de água."

"Onde estão as partículas então?", perguntou Alice. "Por qual abertura elas passam, na verdade?"

"Na verdade, a amplitude não diz isso. Contudo, se elevamos a amplitude ao quadrado, isto é, se a multiplicarmos por ela mesmo para que sempre dê um número positivo, pode-se obter uma distribuição de probabilidades. Se você escolher qualquer posição determinada, é esta distribuição que vai dizer a probabilidade de, ao se observar uma partícula, achá-la naquela posição."

"E isso é tudo que ela diz?", exclamou Alice. "Devo dizer que me parece insuficiente. Nunca se sabe onde alguma coisa estará."

"Sim, isso é verdade. Não se pode dizer onde uma partícula estará, com exceção de que não estará onde a probabilidade é zero, é claro. Se você tiver um grande número de partículas, porém, pode ter certeza de que encontrará mais partículas onde a probabilidade é mais alta e muito menos delas onde a probabilidade é baixa. Se você tiver um número muito grande de partículas, é possível dizer com bastante precisão o lugar onde tantas partículas estarão. Este é o caso daqueles operários de quem você estava falando. Eles sabiam o que iam construir porque estavam usando um número muito grande de tijolos. Para números muito altos, a confiabilidade geral do sistema é muito boa." Ver nota 3 no final do Capítulo

"E não há maneira de dizer o que uma partícula está fazendo sem observá-la?", repetiu Alice, só para ter certeza.

"Não, de jeito nenhum. Quando aquilo que você observa pode acontecer de várias maneiras diferentes, você tem uma amplitude para cada maneira possível, e a

amplitude geral é obtida adicionando-se todas elas. Você terá então uma superposição de estados. De certa forma, a partícula está fazendo tudo que é possível a ela. Não é só que você não sabe o que a partícula está fazendo. A interferência mostra que as probabilidades estão todas presentes e influenciam umas as outras. De certa forma, são todas igualmente reais. Tudo que não é proibido é compulsório." "Eu vi um cartaz que dizia isso no Banco. Parecia muito sério."

"E é! Essa é uma das regras mais importantes por aqui. Onde várias coisas podem acontecer, elas acontecem. Dê uma olhada no Gato, por exemplo."

"Que gato?", perguntou Alice, olhando em volta, confusa.

"Ora, o Gato de Schrödinger aqui. Ele o deixou conosco para que cuidássemos dele."

Alice olhou para onde o Mecânico apontava e viu um grande gato listrado que dormia numa cesta num dos cantos da sala. Como se despertado por ter ouvido seu nome, o gato se levantou, espreguiçando-se. Ou melhor, levantou-se e não se levantou, espreguiçou-se e não se espreguiçou. Alice viu que, além da figura levemente difusa do gato de costas arqueadas, havia também um gato idêntico, que ainda dormia no fundo da cesta. Ele estava muito rígido, numa posição muito pouco natural. Olhando para ele, Alice poderia jurar que ele estava morto.

"Schrödinger desenvolveu um experimento gedanken em que um pobre

gato ficava preso numa caixa, junto com um recipiente de gás venenoso e um mecanismo que quebraria o frasco caso uma amostra de um material radioativo viesse sofrer um decaimento. Tal decaimento é definitivamente um processo quântico. O material pode ou não decair e então, de acordo com as regras da física quântica, haveria uma superposição de estados, onde em alguns o decaimento teria ocorrido e em outros, não. É claro que, naqueles estados em que o decaimento ocorresse, o gato morreria, e nós então teríamos uma superposição de estados de gato, alguns mortos e alguns vivos. Quando a caixa fosse aberta, alguém observaria o gato e dali em diante ele estaria morto ou vivo. A questão proposta por Schrödinger era: "Qual o estado do gato antes de a caixa ser aberta?"

"E o que aconteceu quando abriram a caixa?", Alice perguntou.

"Na verdade, todos estavam tão empolgados discutindo a questão que ninguém abriu a caixa, e é por isso que o Gato ficou assim."

Alice olhou para a cesta onde um aspecto do Gato lambia a si mesmo com dedicação. "Ele parece estar bem vivo", ela observou. Mal as palavras tinham saído de sua boca, o Gato ficou bem sólido e palpável e a versão morta desapareceu. Ronronando satisfeito, o Gato pulou para fora da caixa e começou a perseguir um rato que tinha saído da parede. Alice percebeu que não havia um buraco de rato que ela pudesse ver — o rato tinha simplesmente saído direto da parede. O Mecânico Quântico seguiu a direção do olhar de Alice. "Ah, sim. Isto é um exemplo da penetração em barreiras: acontece o tempo todo por aqui. Onde houver uma região que uma partícula não puder adentrar de acordo com as leis da mecânica clássica, a amplitude não necessariamente cessa de imediato na fronteira da região, apesar de diminuir rapidamente dentro dela. Se a região for bem estreita, ainda haverá alguma amplitude sobrando do outro lado, e isso dá margem a uma pequena probabilidade para que a partícula possa aparecer ali, tendo aparentemente atravessado uma barreira aparentemente intransponível, um processo chamado de 'tunelamento'. Acontece com frequência."

Alice estava repassando em sua cabeça as coisas que tinha visto até então e percebeu uma dificuldade. "Como foi que eu consegui observar o Gato e fixar sua condição se ele não pôde fazer isso por si próprio? O que é que decide que uma observação foi mesmo realizada e quem está capacitado para fazê-las?"

"Essa é uma pergunta muito boa", respondeu o Mecânico Quântico, "mas nós somos apenas mecânicos e por isso não nos importamos muito com essas coisas. Apenas fazemos o trabalho e usamos métodos que sabemos que funcionarão na prática. Se quer alguém para discutir o problema da medida com você, terá de ir a algum lugar mais acadêmico. Sugiro que assista a uma aula da Escola de Copenhague."

"E o que faço para chegar lá?", Alice perguntou, conformando-se com o fato de ter sido passada adiante para mais outro lugar. Em resposta, o Mecânico a levou pelo corredor e abriu uma porta, que não dava para o beco por onde ela tinha entrado, mas sim para um bosque.

Notas

1. A mecânica quântica é normalmente contrastada com a mecânica clássica ou newtoniana. Esta última, que se ocupa da descrição detalhada de objetos em movimento, foi desenvolvida antes dos primeiros anos do século 20 e se baseia nos trabalhos originais de Galileu, Newton e outros antes e depois deles. A mecânica newtoniana funciona muito bem em grandes escalas. O movimento dos planetas pode ser previsto com muita antecedência e grande precisão. Ela funciona quase igualmente bem para planetas artificiais e missões espaciais de exploração: suas posições podem ser previstas anos antes. Funciona muito bem também para maçãs

caindo de árvores.

No caso de uma maçã que cai, a resistência do ar que a cerca será significativa. A mecânica clássica descreve o fato como a colisão de um número enorme de moléculas de ar ricocheteando na maçã. Quando você pergunta sobre as moléculas de ar, respondem-lhe que elas são pequenos grupos de átomos. Quando você pergunta sobre os átomos, faz-se um silêncio constrangedor.

A mecânica clássica não foi bem sucedida ao tentar explicar a natureza do mundo em escala atômica. As coisas devem ser diferentes de alguma maneira para objetos pequenos do que parecem ser para objetos grandes. Para usar estes argumentos, você deve perguntar: pequenos ou grandes em relação a quê? Deve haver alguma dimensão, uma constante fundamental que fixe a escala em que este novo comportamento se torna óbvio. É uma mudança definitiva na maneira com que se observa o comportamento das coisas, e ela é universal.

Átomos no sol e em estrelas distantes emitem luz no mesmo espectro que o abajur na sua mesa-de-cabeceira. A passagem para o comportamento quântico não é algo que acontece apenas localmente; há alguma propriedade fundamental da Natureza envolvida. Esta propriedade é denotada pela constante universal que aparece na maioria das equações quânticas. O mundo é granulado na escala definida por esta constante $\hbar$. Nessa escala, energia e tempo, posição e momentum, apresentam-se borrados entre si. Nem é preciso dizer que, na escala da percepção humana, $\hbar$ é muitíssimo pequena e a maioria dos efeitos quânticos não é absolutamente evidente.

2. O que as relações de incerteza de Heisenberg nos dizem é que vemos as coisas de modo errado. Cremos de antemão que devemos ser capazes de medir a posição e o momentum de uma partícula ao mesmo tempo, mas descobrimos que não podemos. A própria natureza das partículas não permite que façamos tais medições sobre elas e a teoria nos diz que estamos fazendo as perguntas erradas, perguntas para as quais não temos respostas viáveis. Niels Bohr usou a palavra complementaridade para expressar o fato de que é possível haver conceitos que não podem ser precisamente definidos ao mesmo tempo: pares de conceitos tais como justiça e legalidade, emoção e racionalidade.

Há algo fundamentalmente errado com a nossa crença de que deveríamos ser capazes de falar da posição e do momentum, ou da quantidade exata de

energia de uma partícula num instante determinado. Não se sabe bem por que deveria ser significativo falar ao mesmo tempo de duas qualidades tão distintas. Parece que não é tão significativo assim.

3. A mecânica quântica não se refere a partículas definidas no sentido tradicional clássico; em vez disso, trata de estados e amplitudes. Se você eleva ao quadrado uma amplitude (i.e. multiplica por seu próprio valor), você obtém uma distribuição de probabilidades que dá a probabilidade de se obter vários resultados ao se fazer uma observação ou medição. O valor real que se obtém com qualquer medição parece ser aleatório e imprevisível. Acaba parecendo que a sugestão feita mais cedo neste livro de que a Natureza é incerta e de que "vale tudo" deve, no final das contas, ser verdade. Não parece?

Bem... não. Se você faz muitas medições, o resultado médio pode ser previsto com precisão. Anotadores de apostas não sabem que cavalo ganhará cada corrida, mas esperam confiantes fazer algum lucro até o final do dia. Não conseguem prever grandes e inesperadas perdas, pois trabalham com números pequenos cuja média não pode ser confiável. O número de apostadores seria de alguns poucos milhares, em vez dos 1.000.000.000.000.000.000.000 átomos, ou mais, existentes mesmo em um ínfimo pedaço de matéria. Estes dígitos parecem menos com um número do que com o desenho repetitivo de um papel de parede, mas é inegavelmente grande. As flutuações estatísticas médias esperadas em medições com números de átomos tão extensos são desprezíveis, mesmo que o resultado para átomos individuais possa ser bastante aleatório.

Amplitudes da mecânica quântica podem ser calculadas com bastante precisão e comparadas com experimentos. Um resultado muito citado é o do momento magnético de um elétron. Os elétrons giram como pequenos peões e têm propriedades elétricas: eles se comportam como pequenos ímãs. A força magnética e a rotação do elétron estão relacionadas, e esta razão pode ser calculada com o uso das unidades apropriadas.

Um cálculo clássico chega ao resultado 1 (com suposições arbitrárias sobre a distribuição da carga elétrica de um elétron).

O cálculo clássico chega ao resultado 2.0023193048 (± 8) (o erro está na última casa decimal).

Uma medição chega ao resultado $2.0023193048 (\pm 4)$.

É uma ótima concordância! A probabilidade de se conseguir, ao acaso, valores tão concordantes é similar à probabilidade de se jogar um dardo, também ao acaso, e acertar na mosca — quando o alvo está tão longe quanto a Lua. Esse resultado em particular é frequentemente dado como exemplo do sucesso da teoria quântica. É possível calcular, com a mesma precisão, as amplitudes de outros processos, mas são muito poucos os valores que podem ser medidos com essa precisão.

ANEXO III

QUESTIONÁRIO

NOME: _____ Nº _____ SÉRIE _____ DATA: _____

01 – A leitura introdutória do capítulo XVIII – Feiticeiros e Aprendizizes, da Era dos Extremos, de Hobsbaw, foi pertinente para compreensão inicial, e entendimento da importância dos estudos sobre a Física Moderna?

02 – Após sua leitura sobre a alegoria de Alice no País do Quantum, é válido considerar ser possível mesclar a física com a literatura, melhorando seu aprendizado sobre os conceitos físicos estudados? Comente.

03 – Você considera o uso de leituras, textos literários, narrativas e figuras de linguagem, além de outros recursos linguísticos, proveitosos para o ensino da física? Explique.

No livro verificamos que o autor usou a imaginação para criar os personagens e o enredo da história, inserindo os conceitos sobre física quântica por intermédio de figuras de linguagem, analogias e modelos representativos da quântica. A esse respeito, responda os itens abaixo:

04 - Você considera a imaginação importante para a literatura e escrita de histórias? E para a física, a imaginação é importante? Explique.

05 - Por meio da literatura é possível mostrar que a ciência, também, tem características imaginativa e abstrata?

06 - A imaginação poética ou literária pode ser entendida na mesma importância da imaginação científica?

07 - Você considerou bom o uso da literatura nos estudos físicos? De que forma esse uso aproximou os conceitos físicos de você?

08 – Na leitura do livro Alice no País do Quantum, podemos interpretar que as alegorias, as analogias usadas pelo autor, ou seja, a criação dos personagens e do enredo da história, mesclando os conceitos de física quântica, podem ser consideradas como modelos? Explique.

09 – As leituras realizadas ajudaram a você criar, pelo menos uma vaga ideia (generalizações e pseudoconceitos), sobre os conceitos científicos estudados em sala? Explique usando algum exemplo.

10 – Os vídeos ajudaram a formação de seu entendimento sobre os conceitos científicos estudados? O que você julga mais importante para seu aprendizado: o vídeo que já traz uma interpretação própria e pronta ao telespectador? Ou a leitura que lhe garante abstrair os eventos ali escritos?

ANEXO IV

RESPOSTAS DOS ALUNOS AO QUESTIONÁRIO

Aluno 01:

01 – Ajudou bastante a melhor compreender a física moderna

02 – Sim. Mesclar literatura com a física ajuda bastante a “entender” a física, pois nos mostra de uma forma diferente os conceitos. Prende mais nossa atenção.

03 – Sim, pois nos interessamos mais por aquilo que está sendo falado, não fica aquela coisa monótona e chata de ficar estudando.

04 – Sim, para a física também é importante, porque se não conseguimos imaginar, não vamos entender bem a física.

05 – Sim.

06 – Ambas são essenciais para compreender o que está sendo lido, estudado.

07 – Sim, pois me ajudou a entender um pouquinho alguns conceitos, porque esses textos abordam a física de uma forma diferente.

08 – De uma certa forma sim, pois o autor descobriu uma forma de explicar a física, que muitas vezes é algo difícil de entender.

09 – Sim, me ajudaram a compreender melhor.

10 – Para o meu aprendizado é melhor o vídeo, porque consegue com que eu fique mais atenta.

Aluno 02

01 – Sim, pois Hobsbawn explicou detalhadamente a origem da física moderna, além de tratar de uma forma simples de entender.

02 – Sim é possível, com a ajuda da literatura acaba deixando o conceito mais fácil de entender, além de ser uma forma prática de aprendizado para alguns.

03 – Sim, pois muitos têm dificuldade em aprender o conceito só com fórmula e o uso desses artifícios ajuda no entendimento da matéria.

04 – a imaginação é muito importante, quando estamos aprendendo ou lendo algo ela que faz meio um “filme” que auxilia no entendimento e quando precisamos, cria ou reescreve o que aprendemos é a imaginação que faz as ideias fluírem para ter um bom resultado.

05 – Sim, só depende de como o autor vai tentar demonstrar esses fatos em sua obra literária.

06 – Não, pois a literatura e a poesia é uma coisa criada e a ciência é algo concreto.

07 – Sim. A literatura trata o conceito físico com mais clareza, deixando mais simples entender.

08 – Sim, pois a literatura se baseia nos conceitos logo são escritos para demonstrar esses conceitos.

09 – Sim. Ajudou-me a entender a quântica.

10 – O vídeo que já traz o conceito mais específico deixando mais prático de entender.

Aluno 03

01 – Sim. Retrata muito bem sobre a física moderna.

02 – Misturando a literatura com a física o entendimento fica mais fácil. Ainda mais com a “Alice” que é bem conhecida.

03 – Sim. Somente cálculos e “prática” não são suficientes. Teoria e leitura ajudam no entendimento.

04 – Através da imaginação o pensamento “vai longe” e é melhor de se compreender. E na física também é essencial a imaginação, para um bom entendimento.

05 – Na ciência e na literatura há o real e o imaginário, e as vezes através da literatura fica mais fácil de se compreender.

06 – Em ambas tem que haver imaginação e criatividade. A “imaginação é a mesma”, basta ter.

07 – Causou interesse e curiosidade. Gosto mais de literatura que de física e com essa oportunidade me aproximei mais dos conceitos físicos.

08 – Sim, pois um modelo é uma representação da realidade, mas não realidade de fato. É preciso que os cientistas tenham criatividade e imaginação para criarem.

09 – Através da literatura é possível imaginar conceitos da física, como os lançamentos verticais.

10 – Com vídeos a atenção de quem assiste é maior. Eu acho mais importante a leitura, pois cada um entende/interpreta de um jeito. E assim cada um aprende de uma forma.

Aluno 04

01 – Sim, pois Eric Hobsbawn explicava, no texto, a física desde seus primórdios e suas descobertas mais antigas. Ele tentou relatar minuciosamente a física em geral para que o leitor pudesse entender de forma majoritária toda a história e conceitos físicos, além de seus estudiosos para que, então, pudesse falar da física moderna de forma mais completa.

02 – Sim, aliás, é super válido, de modo que com isto o aprendizado fica muito mais prático e fácil, até mesmo ser lembrado, a história da Alice no País do Quantum é um livro muito bem estruturado e criativo.

03 – Sim, pois somente contas a matéria torna-se automaticamente entediante e cansativa.

04 – Com certeza, a imaginação e criatividade são importantes para qualquer área seja literatura, física ou qualquer outra disciplina, pois a criatividade em seu significado mais denotativo possível seria criar, inventar ou produzir algo novo, e algo novo é sempre relevante em tempos modernos e evolutivos.

05 – A ciência muitas vezes tem conclusões muito complexas, ou pode haver coisas que não se pode explicar por meio da lógica, e é necessário caracterizar de forma mais abstrata e “viajante”.

06 – Não. Creio que a imaginação científica seja mais árdua e complexa, o que não desvaloriza a relevância da imaginação poética, porém a ciência é mais difícil por necessitar de mais criatividade.

07 – Foi muito útil o uso da literatura nos estudos físicos, principalmente no meu caso que tenho um pouco de dificuldade com matérias exatas, com a leitura consegui absorver muito mais conceitos da física, de modo que me proporcionou maior entendimento da matéria e um aprendizado mais eficiente.

08 – Sim, pois ninguém sabe a real forma dos elementos e personagens citados no texto, de fato o torna um modelo, uma analogia, tal como seus personagens.

09 – As leituras me auxiliaram muito no entendimento e aprendizado dos conceitos científicos estudados em sala, de modo que agora, com a leitura dos capítulos do livro Alice no País do Quantum pude ver a explicação de uma forma completamente diferente, que se tornou mais simples e de fácil compreensão, tal como a ideia da superposição de estados quânticos. A ideia passada pelo livro faz o leitor analisar de uma forma completamente distinta de uma aula com contas e números, ou seja, foi uma ideia brilhante passar esse tipo de atividade para nós, ainda mais nesta matéria que na maioria das vezes é difícil de entender.

10 – Visualizar a animação ajuda ainda mais a entender. Ambos são importantes, cada qual no seu modo, vídeo é válido para quem não gosta de leitura, para quem prefere ler o livro é melhor escolha, porém os dois juntos surtem um efeito muito maior e mais vantajoso para aquele que está aprendendo.

Aluno 5

01 – Serviu de base para entender o contexto histórico da evolução da física moderna, que de início era uma física sem fundamento, já que não eram comprovadas, ao contrário da física clássica.

02 – É possível mesclar física com a literatura, pois o entendimento do leitor sobre física torna-se mais fácil, principalmente se a física for assimilada por uma história já conhecida, mesmo que confusa para entender, facilita a compreensão.

03 – É proveitoso tanto para um cientista que já bastante do assunto, quanto para um leigo. São com esses recursos que o conhecimento e a informação sejam transmitidos para todos.

04 – Sim. Com a imaginação podemos criar/desenvolver novas hipóteses e outros pontos de vista.

05 – Por meio da leitura vamos criando uma imagem em nossas mentes, principalmente quando se trata de física quântica, que muitas vezes, não há compreensões.

06 - Podem ser entendidas da mesma forma, pois ambas mostram as transformações do mundo e da cabeça das pessoas. Ambos fazem parte da história mundial, em ambos os casos fazem parte da história, e as duas necessitam de muita criatividade.

07 – É uma forma mais divertida de aprender e mais fácil também.

08 – Sim, pois com o livro tendo assemelhar a história da Alice com os conceitos da física, não é realidade, porém é uma forma de apresentação dos conceitos da realidade.

09 – Sim. Principalmente as ideias de superposição de estados, princípio da incerteza e características dos elétrons.

10 – Sim. Conseguimos uma melhor visualização dos assuntos abordados. Eu julguei mais importante a literatura que garante abstrair os eventos, assim podemos construir nossa opinião sobre o que estamos vendo.

Aluno 06

01 – A leitura do capítulo XVIII acabou confundindo, mesmo eu já tendo estudado ela por outros meios. Teve fatos curiosos e interessantes ao longo da leitura, mas foi uma leitura maçante.

02 – Em algumas partes do livro Alice no País do Quantum deu para se entender melhor o assunto abordado, mas em certos momentos ocorria certas dúvidas ou ficava difícil de compreender.

03 – Quando tem outros meios de aprendizagem é sempre uma forma a mais de se aprender, e com a leitura de textos não muda, mas o material deve ser de acordo com a matéria e deve de fácil entendimento.

04 – A imaginação é necessária na literatura e escrita da história. Na física isso também é válido já que em certos momentos deve se ter uma imaginação para se entender o assunto.

05 – Sim. Já que você faz a pessoa pensar sobre isso. O livro é um exemplo, onde a pessoa imagina o que está ocorrendo no livro.

06 – A imaginação científica exige uma maior capacidade de imaginação, já que é mais complicado imaginar um fato científico do que um fato ocorrendo em um livro de poesia. Mas ambas tem a mesma importância e exigem imaginação.

07 – O uso da literatura nos estudos físicos foi algo bom já que é uma forma diferente de aprendizado.

08 – Ela serve como um modelo para se tentar entender sobre o que é proposto, mesmo que em algumas partes ela seja confusa.

09 – Ajudaram a criar. Como o caso do gato de Schrodinger. Pude perceber melhor e entender como isso ocorreu.

10 – O vídeo ajudou muito a entender o conceito, com o vídeo “clareou” as ideias e pude observar como funcionam os conceitos. Pelo assunto ser mais complicado e exigir grande interpretação o vídeo é melhor que o texto, mas vale lembrar que o texto também ajuda.

Aluno 07

01 – Sim, pois lá se explica desde o começo da física, que houve vários erros até ser entendido tudo, e o tanto que foi importante para a atualidade.

02 – Sim, pois qualquer coisa que interage com o leitor é algo útil para o entendimento.

03 – Idem a questão anterior.

04 – Sim, pois quase tudo é imaginado, pois não é tudo que se pode provar no exato momento.

05 – Sim. Como a física quântica há vários conceitos abstratos.

06 – Na científica é mais importante porque há provas concretas com experimentos e contas. Na literária pode entender sim a questão do conceito, porém não há provas.

07 – Por apresentar menos contas facilitou o estudo do assunto.

08 – Facilita a entender em si a matéria, pois o modelo visa apresentar o produto sem ser real.

09 – Como no livro Alice no País do Quantum, ela coloca os elétrons em forma de olhos, guarda chuva para cima e para baixo (para representar os spins), querendo que o leitor imagine de vários jeitos os conceitos estudados.

10 – Prefiro o vídeo que é algo que presto mais atenção.

Aluno 08

01 – Aprendemos sobre as mudanças históricas e conceituais da física nos dias de hoje e antigamente.

02 – Muitas pessoas aprendem mais com conceitos e menos com teorias, por isso o livro me ajudou a entender um pouco mais sobre a Física.

03 – Muitas pessoas aprendem mais lendo textos, narrativas e vendo figuras, do que, vendo apenas números e teorias.

04 – Para escrever livros a pessoa precisa de uma imaginação fértil. Para física a imaginação também é importante, pois a física precisa dela.

05 – Sim. A imaginação colabora para criar os modelos na ciência.

06 – Cada imaginação independentemente de ser poética, literária ou científica tem sua importância.

07 – Sim, pois como eu prefiro as humanas do que as exatas eu entendo mais as práticas literárias do que as teorias físicas.

08 – Sim, pois o autor usa a história da Alice como modelo para explicar a Física Quântica.

09 - Não.

10 – O vídeo que já traz uma interpretação própria e pronta ao telespectador, pois aprendo mais quando vejo a “tal coisa” acontecendo.

Aluno 09

01 – Através da explicação do contexto histórico da transição da física clássica para a física moderna foi possível obter um melhor entendimento de como surgiu a necessidade de estudar o mundo quântico. Com os estudos da física moderna a tecnologia pode ser aprimorada para atender às necessidades do ser humano, proporcionando o “bem estar”, como é dito no capítulo, basta que saibamos apertar alguns botões para executar uma ação, por exemplo, o leitor de código de barras que há nos supermercados, nele existe a ação dos fótons.

02 – É possível mesclar a física com a literatura. Em Alice no País do Quantum são explicadas as teorias da física moderna através de alegorias e modelos, assim facilitando o entendimento básico dos modelos e teorias da física moderna, como a superposição de estados quânticos.

03 – Sim, pois usando modelos do cotidiano para explicar a física fica mais fácil de assimilar o conceito físico, a utilização de recursos linguísticos torna mais fácil a compreensão da física no geral, a moderna e a clássica.

04 – A imaginação é importante, tanto para a literatura quanto para a física. Imaginando fatos e acontecimentos, imaginando um enredo, escreve-se uma história, na física a

imaginação possibilitou a constituição de paradoxos que facilitam a visualização de teorias, como o paradoxo dos gêmeos e o gato de Schrodinger.

5 – O livro Alice no País do Quantum mostra isso, há um capítulo que apresenta uma sala onde a imaginação se “concretiza” e o cientista clássico imagina um modelo para mostrar à Alice a teoria da luz ser onda.

6 – A imaginação científica acaba por se tornar até mais importante que a literária, já que através dela observamos o fundamento de teorias que revolucionam a física.

07 – Foi bom, já que pude ter uma melhor abstração do conteúdo, com o uso da literatura foi mais fácil compreender o conteúdo explicado durante as aulas.

08 – Sim, por exemplo, os spins com guarda-chuvas para cima e para baixo, o coelho que tenta atravessar a porta (tunelamento de energia) e outros exemplos criados pelo autor podem ser considerados modelos.

09 – Com as leituras, facilitou o meu entendimento do conteúdo, como a criação do leitor de supermercado (ver cap. XVIII da Era dos Extremos de Hobsbawn) e os operários, do livro Alice no País do Quantum, que mostravam uma casa sendo construída com base em probabilidades.

10 – Os vídeos e as leituras me ajudaram, os vídeos já nos mostram um modelo pronto e dinâmico, na leitura podemos formar um modelo em nossa mente, o que fica mais fácil de se gravar. Mas ambos são importantes.

Aluno 10

01 – Os entendimentos sobre todos os ramos da física, como a física moderna, precisam ser estudados desde as primeiras teorias, para compreendermos como um todo e não apenas o conceito final.

02 – Para quem apresenta dificuldades em relação aos conceitos da física é interessante mesclar esta com outra matéria, já que temos mais conhecimento com a leitura, uma vez que através de histórias as definições ficam mais claras.

03 – O uso de outros recursos linguísticos para estudar a física, como leitura e narrativas, faz ser possível imaginarmos um outro mundo onde podemos interagir com a história e esta nova percepção de mundo, em que conseguimos enxergar com clareza o que os físicos tentam explicar através de fórmulas.

04 – Para a literatura e escrita de histórias, a imaginação é fundamental, uma vez que é só através dela que a compreensão dos livros é possível. Para a física, a imaginação também é importante, pois é preciso entender como as partículas se comportam no mundo, por exemplo, sendo imprescindível a capacidade de imaginar.

05 – A ciência tem características imaginativa e abstrata, pois a maioria das coisas em física são impossíveis de se ver, então a única maneira é imaginar.

06 – Tanto a imaginação poética quanto a literária possuem importâncias diferentes, pois cada uma precisa de um tipo de compreensão única, uma vez que apresentam assuntos diferenciados e devem ser tratados de modo variado.

07 – Acredito que antes eu não entendia verdadeiramente a física como agora. Claro que não é possível compreendê-la por completo, porém o uso da literatura auxiliou e muito esta compreensão.

08 – Não podem ser considerados como modelos, pois trata-se de personagens inteiramente fictícios.

09 – Sim. A explicação dada pelo professor sobre o modelo de dupla fenda foi ainda mais esclarecedora após a leitura do capítulo 3 do livro, onde Alice vê esses acontecimentos através de uma sala de pensamentos.

10 – A leitura é mais importante para o aprendizado, pois permite ao aluno refletir sobre o assunto e formar uma opinião, o que não acontece com os vídeos, uma vez que estes já trazem informações “mastigadas” para o aluno.

Aluno 11

01 – Foi fundamental para que houvesse uma base através dos conceitos apresentados, o que facilitou a compreensão da física moderna em diante.

02 – Sim, pois com o texto literário a leitura se torna mais descontraída, o que faz com que a física quântica se torne mais compreensível.

03 – O leitor aprofunda mais o seu pensamento e consegue imaginar como funcionam os fundamentos da física, mas é sempre importante conter o próprio conceito da física presente na leitura para que ele seja mais proveitoso.

04 – Com a imaginação é possível compreender melhor o que acontece nos estudos da física.

05 – Sim, pois a literatura permite ao leitor viajar em sua imaginação e com a junção dela com a física, a ação das partículas, por exemplo, se torna mais compreensível.

06 – Não necessariamente, pois a imaginação científica necessita de conceitos para ser compreendida, a imaginação literária precisa de um contexto apenas.

07 – Com um contexto foi mais fácil compreender os conceitos físicos, pois dessa forma a imaginação foi mais longe.

08 – Sim, pois com esse tipo de analogia, alguns termos mais difíceis de se compreenderem, pertencentes à Física Moderna, se tornaram mais compreensíveis, pois o leitor agora cria um contexto, o que o facilita a ter mais ideias e refletir mais sobre as teorias.

10 – A leitura, porque com ela é possível entender exatamente os conceitos, devido ao fato de ela ser mais complexa do que o vídeo.

Aluno 12 (muitas respostas sem nexos)

01 – Sim, porque a leitura nos ajudou a ter uma visão diferente da física. Nos deu a oportunidade de aprender de formas diversificadas, ou seja, mesclar a prática e o conceito.

02 – Sim, já que uma forma apoia a outra. Algumas pessoas tem dificuldades em aprender através de contas e outras através da leitura, então tendo as duas, as pessoas encontram chances maiores para aprender

03 – O mundo de hoje exige o máximo de todos nós. Dessa forma, devemos estar preparados para tudo. Aprendendo de forma mais dinâmica e diferente do casual, estaremos nos preparando para qualquer coisa que possamos vir a enfrentar em nossas vidas.

04 – Para tudo que façamos devemos usar nossa imaginação e nossa criatividade. Essas coisas foram e sempre serão importantes para a humanidade. Através delas conseguimos imaginar o quanto pequeno somos perante o universo e conseguimos criar e inventar boa parte de utensílios essenciais para nossa sobrevivência.

05 – Na literatura podemos nos deparar com um mundo de imaginação, conseguindo transmitir qualquer tipo de sentimentos, ou mensagem para o leitor. Já que tudo no mundo se trata de ciência, do concreto e abstrato, da imaginação.

06 – qualquer forma de aprendizado deve ser considerada importante. E a imaginação é a melhor forma de se obter conhecimento, então não importa se é imaginação literária ou científica, porque ambas tem a mesma importância.

07 – O uso da literatura foi bom, pois ampliou o universo de aprendizagem para nos ajudar.

08 – Sim, porque ele nos mostra diversas “formas” da física quântica. Em outras palavras, nos apresenta modelos para auxiliar em nossa aprendizagem.

09 – Sim. Porque ela nos serve de apoio, como no caso da dupla fenda ela nos mostra, nos dá a ideia, nos permite construir um modelo para solucionar problemas.

10 – Ambas devem ser usadas, servindo de apoio uma para outra. Já que na literatura podemos imaginar as coisas do jeito que quisermos e o vídeo nos ajuda a não escapar muito da realidade.

Aluno 13

01 – A leitura deu uma base para a melhor compreensão da matéria dada em aula e mostrou pontos novos que muitos não haviam pensado.

02 – A teoria física mesclada a uma história interessante nos ajuda a focar e compreender melhor a matéria que está sendo passada no livro e torna o estudo em algo mais leve e prazeroso.

03 – Tanto para física quanto para todas as outras matérias, pois adequa o estudo a algo do cotidiano.

04 – A imaginação é fundamental para escrever qualquer tipo de história. No caso da física é necessária muita imaginação para conseguir abstrair os conceitos e tornar isso mais fácil de visualizar a teoria. (grifo meu)

05 – Sim. Transformando a ciência em uma estória que repasse a teoria.

06 – Sim, pois abstrair sentimentos e torna-los histórias é tão difícil e importante quanto fazer o mesmo com a ciência e torna-la em teorias.

07 - Sim, já que a leitura me fez enxergar o quanto a física está presente no dia a dia.

08 – Podem, porque não são histórias reais, e sim modelos criados para entender a realidade.

09 – Acho que seria necessário reler ou ler mais alguns textos para conseguir ter uma ideia mais concreta sobre as teorias, mas já foi possível visualizar coisas como a teoria da superposição de estados e etc.

10 – O vídeo proporciona grande ajuda sobre os conceitos da dualidade da partícula, porém, considero mais proveitoso tirar a própria interpretação na leitura dos textos.

Aluno 14

01 – A leitura introdutória do capítulo XVIII – Feiticeiros e Aprendizes, apenas com a leitura ficou muito confuso, pois como era uma coisa nova é mais complicado entender. Só ficou um pouco mais claro quando foi explicado na aula. Seria um pouco mais fácil entender a Física Moderna, se a leitura fosse complementar não de base. Ela já é complicada, se fosse explicada na aula para depois ler seria mais fácil compreendê-la.

02 – Mesclar a física com a literatura, torna a leitura mais interessante e sempre que você vê algo relacionado a física vai se lembrar da parte da história, porém quando tem muita informação junta confunde.

03 – Recursos linguísticos podem ser proveitosos para o ensino da Física, porém apenas para teoria e a física vai além de apenas teoria. Os vídeos aonde se conseguem ver, fica mais fácil visualizar e entender a física e a matéria (conteúdo) que está se aprendendo.

04 – A imaginação é muito importante para a escrita e para a literatura, sem imaginação não se consegue criar uma história, então, para literatura a imaginação é essencial. Para a física com a imaginação você vê, digamos, abre os horizontes para entender melhor o mundo, porém se for apenas estudar a física, não é necessário ter tanta imaginação.

05 – Sim. Principalmente com a física quântica, muitas coisas parecem abstratas, porém são imaginativas. E com a literatura é possível verificar essas características.

06 – Em alguns casos a imaginação científica é mais importante do que a imaginação poética e literária, pois acaba usando essa imaginação no dia a dia. E afeta a vida de várias pessoas.

07 – Sim, porém com vídeos você consegue entender os conceitos mais facilmente. A literatura faz com que você tenha mais vontade de ler os conceitos, porém não de entendê-los, os vídeos, a visão, você entende melhor os conceitos.

08 – Sim, elas podem ser usadas como modelos, elas nos ajudaram com a aprendizagem, serviu como base para nos ajudar a entender a física quântica.

09 – Ela nos ajudou a ter uma vaga ideia, como por exemplo, o da dupla fenda, por mais confuso que seja nos ajudou a ter uma noção, mas só consegui ter uma ideia melhor quando explicado em sala.

10 – Os vídeos ajudaram muito, pois várias vezes não conseguimos visualizar o conceito na leitura e no vídeo você consegue. Não tem o mais importante, porém com o vídeo o aprendizado é mais fácil. Você consegue entender mais facilmente, com a leitura muitas vezes vêm várias coisas na sua cabeça e você não entende nenhuma.

Aluno 15

01 – Sim. Foi pertinente, porque através dela pode se ver como foi difícil a aceitação da Física Moderna, que ia contra tudo que os físicos sabiam até então. Apresenta, também, suas principais ideias, seus paradigmas, os estudos realizados por vários físicos e seu impacto sobre a sociedade, conceitos, entre outros, o que tornou a física moderna mais “clara”, mais compreensível, o que é difícil no primeiro momento que entramos em contato com ela.

02 – É válido mesclar a física com a literatura, melhorando meu aprendizado sobre os conceitos físicos estudados, uma vez que a literatura faz com que as ideias se tornem mais claras, abordando um método mais interativo, divertido, o que facilita a assimilação de informações e dá aos jovens gosto pela aprendizagem, já que muitas vezes, apenas a fala não serve de motivação.

03 – Sim, porque é muito mais difícil a aprendizagem por meio de uma linguagem técnica, que quase ninguém entende. Esses “elementos” nos ajudam a entender uma mesma ideia que aprendemos em sala de aula, porém de forma mais fácil, com coisas que conhecemos em nosso dia a dia.

04 – É por meio da imaginação que se criam as melhores histórias. Criar obras literárias sem imaginação é o mesmo que criar uma literatura sem vida, pois a imaginação nos faz viajar para outro mundo, um mundo só seu, conhecer novas realidades, criar um universo fantástico, tornando a leitura mais divertida e fazendo com que ela penetre

neste mesmo mundo. A imaginação também é importante para a física, pois sem ela, muitos físicos não teriam descoberto coisas que existem hoje, e, além disso, com a imaginação podemos criar modelos para ajudar a entender melhor a realidade. Sem a imaginação não haveria o gato de Schroedinger, porque foi preciso imaginar o gato dentro da caixa para entender o conceito de superposição de estados.

05 – Sim, porque a literatura faz com que imaginemos a física e seus modelos, ou seja, que imaginemos a ciência, de um modo que possamos entendê-la claramente, mostrando que ela tem características abstratas e imaginativas.

06 – Sim e talvez até maior, já que a imaginação científica promoveu descobertas, gerou ideias e conceitos, que foram de extrema importância para a física e ainda são.

07 – Sim, porque ela me fez enxergar coisas que nunca havia pensado antes, ajudou a esclarecer muitas dúvidas, por meio dos modelos abordados pelo autor. Com a literatura pude aprender os conceitos da física moderna facilmente, por ter utilizado coisas que são do meu conhecimento, como, por exemplo, o spin do elétron representado por um guarda chuva.

08 – Sim. As abordagens feitas pelo autor, as alegorias e analogias utilizadas, não são a realidade, foram apenas uma maneira que o autor encontrou para facilitar o entendimento do leitor para com a física moderna.

09 – Sim. Ajudaram, principalmente o livro Alice no País do Quantum, que além de me ajudar a entender o que era um fóton (pacote de luz, de acordo com o livro), algo que antes da leitura eu não tinha conhecimento, me ajudou a entender mais sobre o comportamento da luz, que é dual, por meio da experiência com as fendas, que comprovou essa dualidade, e também o gato de Schroedinger, que também foi representado no livro.

10 – Sim, porque com o vídeo eu pude ver a parte experimental com mais clareza e assim, entender alguns conceitos que estavam confusos, aprendidos em sala de aula. Acredito que ambos são importantes, que um complementa o outro, já que com a literatura você pode imaginar e assim visualizar o modelo em sua cabeça, mas se isso não for possível em algum momento, o vídeo trará essa mesma visualização para você, ou seja, o vídeo pode esclarecer coisas que você não entende apenas pela leitura. Também ajudou a imaginar os experimentos da Física Moderna, trazidos no livro, o que consequentemente, me ajudou a entender os conceitos.

Aluno 16

01 – Foi pertinente.

02 – Sim, pois assim você traz os conceitos da física em uma forma de melhor entendimento para os leigos.

03 – Sim. Ajuda na melhor compreensão do texto.

04 – Sim, pois você pode tentar explicar o conteúdo da melhor forma possível.

05 – Sim. É possível.

06 – Sim, pois a imaginação literária nasceu com a nossa cultura, e a física, também, de certo modo.

07 – Sim. A leitura me ajudou a abstrair o conteúdo e assim eu entendi melhor os conceitos.

08 – Sim, porque não são elétrons de fato .

09 – Sim, por exemplo, os elétrons com guarda-chuvas.

10 – Mais ou menos, eles me esclareceram dúvidas, mas me deram mais. Prefiro uma leitura que me força a pensar.

Aluno 17

01 – Sim, pois com a leitura compreendi melhor os conceitos da física moderna.

02 – Mesclar a literatura com conceitos de difícil compreensão, não apenas de Física, e usando uma linguagem popular ou de fácil entendimento, ajuda na compreensão desses assuntos para pessoas com mais dificuldade.

03 – Na física há muitos conceitos e ideias difíceis de compreender, por serem conceitos que fogem de nossa realidade, então ter narrativas, figuras de linguagem e outros recursos linguísticos facilitam o entendimento.

04 – Ambos necessitam de sua imaginação para serem criados, imaginados ou vistos.

05 – Sim, porque para imaginar muitas coisas, elaborar teorias sobre a física quântica, muitas vezes se necessitou do uso da imaginação.

06 – Sim, pois uma é tão importante quanto a outra.

07 – Sim, me aproximou de um bom modo, de maneira que me ajudou a entender a física moderna e a quântica.

08 – Sim. São modelos de entendimento da física quântica que facilitam nosso entendimento.

09 – Sim, me ajudou muito.

10 – Considero vídeos mais importantes porque vem com os conceitos prontos e corretos, já os livros vêm com a possibilidade de abstrair e tirar suas conclusões, porém essas conclusões podem ser erradas.

Aluno 18

01 – O modo que o autor relacionou a ciência ao cotidiano foi muito eficaz para instigar minha curiosidade e interesse.

02 – É uma coisa bem difícil de ser feita, para ter qualidade, mas quando feita é muito benéfica, não somente para o aprendizado dos alunos, mas também para a alfabetização científica da sociedade como um todo.

03 – Eu acho que para a maioria da sala de aula (qualquer sala de aula) é um recurso que ajuda, mas pessoalmente não gosto muito. O coração da física é a matemática e esses recursos nos afastam um pouco desse foco.

04 – Claro. Para a literatura e escrita de histórias, já para a física nem tanto. O entendimento da física é a coisa mais importante e a imaginação é um adendo a isso .

05 – Sim. O entendimento que a ciência é uma coisa fria e calculista é uma ideia criada pela analfabetização científica da sociedade.

06 – Sim. É de suma importância a abstração na hora de resolver exercícios.

07 – Sim. Me instigou a entender melhor os conceitos ao mesmo tempo em que fazia gostar mais da matéria no geral .

08 – Esse é exatamente o propósito que o autor tinha em mente quando escreveu o livro, e é exatamente o que o livro é.

09 – Sim. O livro Alice no País do Quantum, na parte em que os pedreiros estão construindo a casa, me ajudou a ver a profundidade e complexidade do princípio da superposição de estados.

10 – Eu não gosto de receber as coisas mastigadas, a não ser em último caso, portanto prefiro a leitura.

Aluno 19

01 – Me passou uma compreensão coerente ao mundo paralelo de Feiticeiros e Aprendizes, ele citava situações que hoje pode ser com parada com a física moderna.

02 - Sim. Alice no País do Quantum utiliza muitos objetos que usamos no dia-a-dia a favor da física.

03 – Qualquer forma de passar conhecimento é válida, principalmente quando buscamos suas origens.

04 – Sim. A imaginação é um fator importante para o entendimento dos exercícios.

05 – Sim, assim como o surrealismo é um fator importante para a literatura, a ciência, também tem suas hipóteses .

06 – Não, pois a imaginação científica é mais complexa do que a literária, e muitas vezes a imaginação poética é abstrata .

07 – Sim, pois a assimilação da literatura nos conceitos da física torna seu fundamento mais interessante e prazeroso no seu aprendizado.

08 – Sim, pois todos os personagens do conto Alice no País do Quantum, tem alguma característica relacionada com os conceitos da física moderna.

09 – Sim. As leituras foram uma ótima base para os entendimentos dos conceitos físicos, o exemplo foram as explicações e os vídeos passados em aula.

10 – Ambos são necessários para o completo entendimento do assunto, os exemplos e as imagens dos vídeos nos passa uma ideia mais clara da matéria.

Aluno 20

01 – Deu a entender sobre as mudanças pelas quais a física passou.

02 – Acabou deixando mais claros sobre os conceitos da física.

03 – Mais ou menos, porque claro que temos que saber interpretar os problemas, mas não acho que preciso ler livros para entender.

04 – Sim e sim, porque precisamos na leitura imaginar como seria aquela história.

05 – Nos faz viajar, nos ajuda a imaginar as fórmulas.

06 – Sim, pois na ciência temos que imaginar coisas diferentes como números e fórmulas.

07 – Sim, porque nos ajudou a entender melhor e nos aproximou dos conceitos da física.

08 – Para nos ajudar a entender melhor a história que estamos lendo.

09 – Sim, como por exemplo, a dupla fenda.

10 – Sim. O Vídeo, pois tem uma animação própria e pronta que nos mostra claramente o que temos que entender.

Aluno 21

01 – Acho que não, pois acho que confundiu e não consegui relacioná-lo com a física.

02 – Sim, pois na literatura pode auxiliar no entendimento da matéria estudada.

03 – Com o uso de figuras de linguagem, e outras, fica mais fácil de trabalhar e imaginar o que está acontecendo e o que se pede.

04 – Para ambos é importante a imaginação, pois assim auxilia no entendimento da questão ou da história, criando símbolos para explicar os fenômenos.

05 – Sim, pois há coisas que você consegue imaginar e já outras você não consegue, e na literatura também ocorre isso.

06 – Sim. Acho que a imaginação científica é mais importante do que a imaginação literária, pois a física se entende melhor com cálculos. Mas a física literária também é importante para ter criatividade e imaginação.

07 – Sim, em partes ajudou bastante com o uso da literatura, que me fez entender que a física está em nosso cotidiano e pode ser explicada.

08 – Na verdade isso não demonstra o que é, e sim o que acha que é, para poder entender melhor.

09 – Sim, como por exemplo, a superposição de estados, que com a leituras foi mais fácil de entender lendo as ideias propostas.

10 – O vídeo ajudou a compreender, e prefiro livros, pois fica mais fácil de entender os fenômenos ocorridos.

Aluno 22

01 – Sim. O capítulo XVIII – Feiticeiros e Aprendiz – Era dos Extremos, de Hobsbawn, traça uma cronologia da física moderna. É necessário esse processo para aprofundarmos e inovarmos teses e conceitos estabelecidos desde sua maternidade e todo seu desenvolvimento.

02 – Com certeza, a mescla da literatura com a física contribui para o melhor entendimento de todos aqueles que necessitam saber, porém, apresentam maiores dificuldades. No caso de Alice no País do Quantum, há diversos conceitos como elétrons, fótons entre outros, que facilitam a visualização e, pelo contexto histórico, nos ajudam a relembrar suas definições, pelo comportamento das personagens no conto.

03 – Sim, esses contribuem no quesito recordação de conceitos, definições e funcionamento de mecanismos, partículas entre outros.

04 – Da mesma forma que a imaginação contribui para a literatura, não só no quesito acadêmico, mas também no quesito pessoal de cada indivíduo. Dessa forma, pode definir que a imaginação contribui, e muito, para o estudo da física. É necessário ter uma mente aberta, para assim, expandir seus horizontes.

05 – Sim. Não havendo a utilização, apenas de ciências de caráter matemático, ao analisarmos seus conceitos, para fazê-lo de forma mais precisa e simples, podemos utilizar o método de imaginação, abstrata ou não.

06 – Ambas as imaginações, poética ou científica, tem importância fundamental e exercem grande influência em nosso cotidiano. Dessa forma, não podemos julgar uma coisa mais importante que a outra.

07 – Sim. Sempre que tentar remeter a algum conceito físico, faço referências a textos dados e resenhas já realizadas anteriormente.

08 – Não, pois no livro todas as personagens são fictícias.

09 – Sim. Como no caso dos elétrons, foi mais fácil fixar a ideia de que esses são partículas que necessitam estar em constante movimento para permanecerem estáveis. Quanto menor sua agitação, maior o espaço que ocupa.

10 – A leitura, pois, essa nos permite fazer nossas próprias observações e definir por nós mesmos, o que julgamos ser mais importante. Já os vídeos apresentam conceitos exemplificados por terceiros, que podem dificultar nosso entendimento.

Aluno 23

01 – Lendo esse capítulo eu compreendi de uma forma geral a importância da física moderna.

02 – Sim, porque a literatura pode tornar o aprendizado mais interessante.

03 – Esses artifícios podem tornar os conceitos mais fáceis de aprender.

04 – Para a literatura e história é importante usar a imaginação e para a física é importante, dependendo da situação.

05 – Na literatura é preciso soltar a imaginação, na física é preciso ter certeza.

06 – Não, porque muitas vezes a imaginação poética é uma coisa que não existe, a científica deve ter fatos.

07 – Com a leitura de estudos físicos consegui entender os conceitos.

08 – Com a leitura nos estudos da física consegui entender os conceitos.

09 – Sim. Observando a experiência da dupla fenda eu compreendi a superposição de estados.

10 – Sim. A leitura é melhor para desenvolver os pensamentos.

Aluno 24

01 – Sim, porém só me serviu para entender a virada ocorrida na física ao longo do tempo e como foram feitas as teorias, não aprendi a aplicá-las até aquele momento.

02 – É válido. No meu caso, assim como na aula, a leitura foi super confusa de início. Foi necessária calma e umas releituras para compreender ao menos um pouco do que estava escrito. A leitura ajudou com dúvidas que foram surgindo e logo após explicadas e debatidas com o professor.

03 – Nunca havia tentado esse método. É cansativo, porém, interessante em alguns pontos. É proveitoso não apenas na física quântica. Queria poder ter usado o método em física clássica.

04 – Sim, para tentar entender um modelo.

05 – Em vários casos, imaginando o cenário e criando um modelo para melhor entendimento e compreensão.

06 – Creio que ambos tenham a mesma importância.

07 – Os livros como Alice no País do Quantum fazem paradoxos, aplicando os conceitos difíceis de entender da física, com exemplos práticos do cotidiano, trazendo interesse.

08 – Sim, pois aquilo que está no livro não é comprovado experimentalmente. O autor fez uma suposição e criou o modelo. Como na parte em que Alice se depara com um elétron com a mão para cima e outra para baixo, representando o spin do elétron.

09 – Uma vaga ideia sobre superposição e probabilidade foi criada, não digo que foi um entendimento completo.

10 – No meu caso não, preferi a leitura. Em física clássica acho que um vídeo demonstrativo do evento seria o suficiente, mas em física quântica é absolutamente necessária a leitura. Se com ela já foi difícil até de ter alguma ideia, nem imagino como seria sem.

Aluno 25

01 – Nos contou o início da física moderna. Deu-me base para o meu entendimento.

02 – Se trata de um modo diferente de você estar aprendendo a física.

03 – Sim, pois se trata de novos modos de você vir a aprender a física.

04 – Eu considero importante a imaginação para tudo, pois sem imaginar não tem como você compreender os textos, muito menos a física.

05 – Sim é possível.

06 – Sim. Pode ser compreendida pela interpretação.

07 – Sim. Na compreensão do texto.

08 – Sim, pois pode estar dando um start para a física moderna.

09 – O próprio livro Alice no País do Quantum nos ensina a física moderna.

10 – O vídeo nos ajuda a interpretar e dar melhor sentido ao entendimento.

Aluno 26

01 – Sim, pois atualmente as pessoas não dão valor para a física, apenas usam ela sem entender como aquilo acontece.

02 – Sim. Não apenas em conceitos físicos, mas qualquer matéria pode ser introduzida na literatura, um exemplo usado no livro é quando Alice esta com o pescoço estendido

e uma ave compara ela com uma girafa. Diante o argumento de que o pescoço dela era longo. Como girafas têm o pescoço longo, logo Alice era uma girafa. Resumindo: $A = B$, $B = C$, então $A = C$.

03 – Sim, quando bem usados, pois eles tratam de um outro ângulo a física, por exemplo.

04 – Sim, ambas são importantes, na física a imaginação resulta nos modelos, como a representação de um elétron como sendo uma bolinha, mas o elétron não é uma bolinha.

05 – Sim, algumas coisas na ciência são muito abstratas, como por exemplo, a relatividade.

06 – Sim. Cada uma é importante na sua área, a imaginação literária serve para fazer as obras primas, a imaginação científica serve para elaborar os modelos, por exemplo.

07 – Para minha pessoa não faz muita diferença .

08 – Sim, pois são representações de uma realidade.

09 – Como eu disse na questão 07, para minha pessoa não alterou muito meu pensamento.

10 – ambos para mim são iguais, difere apenas o modo em que o criador retratou o acontecimento, o conceito.

Aluno 27 (INICIO DA TURMA DO 3º B)

01 – Sim. A leitura introdutória complementou a teoria apresentada em aula e a física moderna ficou usual.

02 – Sim. As fórmulas são importantes, mas precisamos saber de sua origem e os modelos complementam isso, nos mostrando um modo divertido de entender a física.

03 – Sim. Em minha opinião imagens são bem mais proveitosas, mas uma literatura simples e bem escrita explica mais do que apenas fórmulas.

04 – Sim. A imaginação é responsável pelo entendimento completo. Analogias são bem aproveitadas, principalmente em física, ao conseguir imaginar uma teoria, um modelo, consegue-se assimilar os conceitos.

05 – Sim. Acho que por meio da imaginação o homem desenvolve as descobertas, por meio da criatividade e da curiosidade é possível mostrar ciência através da literatura.

06 – Acredito que sim, mas são usadas para finalidades diferentes. A literatura poética é apenas escrita por prazer, a literatura científica tem que passar um conceito verdadeiro por meio de uma história fictícia.

07 – Sim. Com o uso da imaginação as teorias físicas ficam mais simples e o entendimento foi mais amplo, como por exemplo, a analogia usada no paradoxo do gato facilitou meu aprendizado.

08 – Sim. Os modelos usados no livro auxiliam no melhor entendimento, utilizando personagens e mexendo com a nossa imaginação fica mais fácil de visualizarmos os conceitos.

09 – Sim. O conceito de dupla fenda, onde a partícula passa a se comportar como onda me ajudou a assimilar melhor, entendi a finalidade do observador, porém, tenho mais facilidades com imagens.

10 – Sim. O vídeo é apenas um complemento, porém, entendo melhor do que lendo, somente a leitura pode te trazer o entendimento completo, mas as imagens ajudam a formular melhor a ideia.

Aluno 28

01 – Sim, pois mostrou de onde surgiu a ideia da Física Moderna, e quando você entende uma ideia desde o início, o entendimento fica muito mais fácil.

02 – A leitura serviu como base para entender que quando trabalhamos com a literatura e física junto a compreensão fica muito mais fácil, pois entendemos a ideia.

03 – Sim, pois foge da igualdade didática que é apenas o estudo de fórmulas.

04 – Para um bom entendimento a imaginação é essencial, pois se você conseguir imaginar as coisas fica muito mais fácil, pois você traz para sua realidade.

05 – Com certeza, pois quando você consegue imaginar o aprendizado fica muito mais fácil.

06 – Com a imaginação em ambas as disciplinas, você consegue trazer tudo para sua realidade.

07 – Nem tanto, pois tenho certa dificuldade em leitura.

08 – Claro, pois eles são os modelos da física quântica.

09 – Nem tanto, o que me ajudou mais foi o vídeo.

10 – A leitura é importante para formar sua ideia própria, mas o vídeo já vem com essa ideia pronta.

Aluno 29

01 – Sim, pois com o estudo da origem dos fatos nós podemos ter uma noção melhor para a compreensão dos conceitos da Física Moderna.

02 – Sim, pois como a física também conta com grande conteúdo conceitual, a literatura pode trabalhar em cima disso, para que os estudos possam ser mais atrativos por conta do uso de alegorias literárias.

03 – Sim, porque a física pode contar com tais artifícios para ser ainda mais interessante.

04 – É a partir da imaginação que surge a criatividade dos autores, e inclusive, o envolvimento deles com a física, pois é com a imaginação que se cria alegorias para relacionar a física com a literatura.

05 – Todos os conceitos físicos só surgem através de cálculos matemáticos após terem passado pela imaginação de alguém antes de concretizá-lo.

06 – Sim, pois da mesma forma que quando lemos um livro, imaginamos todo o cenário e os personagens propostos, então, quando vemos conceitos físicos, também podemos imaginar o cenário proposto.

07 – Sim, pois muitas vezes tenho dificuldade na compreensão da linguagem matemática, e a literatura me ajudou muito neste sentido.

08 – Sim, pois eles são como exemplificações a todos os conceitos da física moderna.

09 – Sim, como o conceito de que a matéria se comporta ou como partículas ou como onda.

10 – Acredito que o vídeo seja mais eficaz, do meu ponto de vista. O vídeo já ilustra o conceito idealizado, enquanto na literatura há a possibilidade do leitor se confundir.

Aluno 30

01 – Sim, pois podemos obter uma compreensão inicial sobre a física moderna, ter uma ideia prévia dos conteúdos que serão ministrados posteriormente.

02 – Sim, porque mesclando a física com a literatura fica mais fácil para compreender e até mais interessante e divertido.

03 – Considero que sim, pois fica mais interessante e podendo ajudar a entender a matéria.

04 – Sim, pois sem a imaginação as histórias não tem graça e na física é importante, porque podemos imaginar os experimentos e como as coisas acontecem.

05 – Sim, como por exemplo, a Alice no País do Quantum que mostra que é abstrato os lugares e imaginativo e isso ajuda a compreender.

06 – As duas imaginações, tanto poética quanto a científica, são importantes, porém para meios diferentes.

07 – Sim, porque facilitou um pouco para entender a matéria e me aproximou dos conceitos físicos por me fazer a ter mais interesse.

08 – Sim, pois ajudou a compreender e a entender os conceitos, fazendo com que nós imaginemos os acontecimentos.

09 – Sim, como o texto de Hobsbawn onde aprendi sobre algumas coisas do cotidiano como o operador de caixa de supermercado .

10 – Os vídeos me ajudaram sim na formação do meu entendimento sobre os conceitos científicos e eu acho os vídeos mais importantes, porque é mais fácil para interpretação do que a leitura, pois na leitura tive dificuldade em alguns momentos para entender os conceitos.

Aluno 31

01 – Sim, pois para tudo na vida temos que aprender primeiramente a teoria para depois entendermos melhor a prática. Muitas vezes na física não aprendemos muito a teoria, o porque das fórmulas, apenas decoramos e colocamos no papel, mas de onde será que surgiram? Essa é uma questão que tem que ser muito bem colocada em todas as aulas e situações.

02 – Sim é fundamental mesclarmos os dois para termos um maior entendimento da matéria.

03 – Sim é uma forma de interagir melhor com a leitura e com a física, dependendo de como for introduzido o texto acaba sendo mais atraente.

04 – A imaginação é sempre fundamental para poder criar uma boa imagem da leitura, mas na física a imaginação tem que ser usada de uma forma sabia para não ser colocado o tema de uma forma exagerada e muitas vezes falsa.

05 – Como todas as leituras de todos os tipos, na ciência essas características estão presentes, por exemplo, quando estamos lendo uma experiência que foi feita podemos imaginar o tamanho das coisas, as cores, os tipos de objetos e entre outros.

06 – A imaginação poética ou literária é fundamental para um bom desenvolvimento da história que o texto quer retratar e na física é praticamente a mesma coisa, mas nesse caso é o conteúdo a ser mostrado.

07 – Eu considerei bom, mas a minha proximidade com os conceitos não foi muito grande pelo simples fato de eu não ter entendido muito o texto, pois tenho mais facilidade com vídeos.

08 – Sim, é um tipo de modelo para ser estudado de outra forma.

09 – Sim, pois com a leitura podemos ir mais á fundo com as matérias e os temas abordados em aula. Um exemplo disso é o conceito de Newton, que fala que o tempo e o espaço são absolutos.

10 – Sim, para mim os dois tem a sua importância, as vezes com o vídeo eu aprendo com mais facilidade, pelo simples fato de já ter uma interpretação, mas também você poder criar uma própria interpretação é bom para entender o conceito da sua própria maneira.

Aluno 32

01 – A leitura do capítulo XVIII pode-se considerar que foi um pontapé inicial no estudo da física moderna e nos ajudou na compreensão da história da física.

02 – Com certeza, pois a física não é somente cálculos, ela envolve todo um conceito teórico, prático e um completa o outro.

03 – Sim, pois cada pessoa tem o seu método de aprender, uns tem facilidade com a leitura e outros com imagens, como o exemplo do Dr. Quantum .

04 – Tanto para a literatura, quanto para a física, a imaginação é muito importante para a compreensão de textos, ela auxilia na criação dos conceitos.

05 – Sim, pois você consegue retirar do mundo abstrato e recriar em sua mente o que você pensa.

06 – Na minha opinião eu acho que não, pois a física tem o seu conceito e a poesia e a literatura tem outros.

07 – A leitura me ajudou a compreender os conceitos, mas ajudou na introdução do cálculo.

08 – Sim, pois ele representa uma coisa real, que nós não sabemos realmente como ela é, por exemplo, os elétrons.

09 – Ajudou a entender os conceitos de Newton, quando ele fala que o tempo e o espaço são absolutos.

10 – Eu acho mais fácil a compreensão através dos vídeos, pois ele já te passa uma imagem e um modelo prontos.

Aluno 33

01 – Acredito que a física moderna torna-se mais compreensível e muito importante para a sociedade, no livro todas as teorias tem um posicionamento e no caso, foi possível perceber que uma única teoria pode comprovar outras duas, que é o caso da dupla fenda, em que o elétron se comporta hora como partícula e hora como onda.

02 – Sim, pois a teoria da física pode ser baseada na literatura e sua compreensão também.

03 – Extremamente proveitosa, pois se a física só possuísse fórmulas sem explicação concreta para a sociedade seria algo sem significado, sem importância, ou seja, não passaria de uma ideologia insignificante .

04 – Sim, pois sem imaginação a física não teria mistérios, nem desafios para desvendar, e o mundo seria estático intelectualmente.

05 – Sim, é possível, pois a ciência está tão avançada que todas as experiências de teorias, podem ser explicadas para os leigos, ou seja, a física pode ser compreendida.

06 – A imaginação poética ou literária pode não ser entendida como a científica, pois a científica é mais complexa, além disso, possui um resultado teórico, com explicação de entendimento complexo e que a sociedade em si não entenderia.

07 – Se aproximou aplicando os conceitos da física à literatura, ou seja, experiências com estudos literários que chegaram a formar teorias de física.

08 – Podem ser considerados modelos, pois trata de representações impossíveis de serem visualizadas do ponto de vista macroscópico. O princípio da incerteza mesmo comprova isso, e o livro da Alice também, pois ela não consegue conversar com um elétron parado.

09 – Sim, como por exemplo, o banco de energia para elétrons ajudou a entender o quanto o elétron necessita de energia.

10 – Ambos os recursos são de extrema importância, pois se o aluno não entende o que lê, o vídeo ajuda à compreensão da teoria ou experimento.

Aluno 34

01 – Sim, neste capítulo Hobsbawm deixa claro que a física não é apenas cálculos e sim, tudo o que se passa em nosso cotidiano, como a guerra, em que é citada a criação das bombas, ou de novas armas mais potentes com muitos tiros por segundo, entre outros. Tudo isso envolve a física moderna, por causa da tecnologia e uma boa compreensão inicial onde tudo está relacionado com a matéria .

02 – Sim, pois livros como, Alice no País do Quantum utilizam teorias mostrando que física não utiliza somente cálculos e sim, literatura, geografia, história e tudo que envolve nosso cotidiano.

03 – Sim, um bom vocabulário ajuda no entendimento de outras matérias também, entre elas a física.

04 – Sim, a leitura e a física fazem um uso abstrato da matéria para um bom entendimento.

05 – Sim, pois a ciência possui uma base imaginativa (teórica) depois a prática.

06 – Sim, tanto a imaginação poética, quanto a científica, possui grande importância, pois desenvolvem as nossas imaginações.

07 – Sim, a literatura usa um bom vocabulário, então quando lemos algo da física conseguimos entender melhor.

08 – Sim, para termos uma base e conseguirmos entender com mais facilidade.

09 – Sim, vaga ideia de que o tempo e o espaço são absolutos.

10 – Os vídeos não desenvolvem a nossa imaginação como nos livros, mas dão um entendimento maior.

Aluno 35

01 – Sim, nesse capítulo conseguimos ver muito bem a teoria da relatividade, o crescimento da ciência e toda sua evolução muito claramente.

02 – Sim, pois com a literatura a compreensão da física moderna fica muito mais fácil.

03 – O uso da literatura em geral pode ser muito proveitoso para a física, eu penso da seguinte forma: - Física não é só fórmulas, existe uma teoria por trás de cada fórmula e a literatura ajuda a aprendermos essas teorias .

04 – Sim, pois sem os desafios propostos e a imaginação dos físicos, a física poderia estar estagnada.

05 – A ciência cresceu de tal forma que hoje em dia todas as teorias podem ser explicadas com experiências, facilitando o entendimento dos leigos.

06 – a imaginação poética ou literária nos remete aos sentimentos, e a imaginação física tenta nos mostrar a verdade sobre uma teoria.

07 – Sim, aproximou relatando a evolução da física, com a teoria, sendo explicado e mostrando detalhadamente o resultado das experiências.

08 – Sim, pois tudo o que tem na obra se trata de uma representação do mundo subatômico, mostra muito bem o princípio da incerteza, quando Alice tenta conversar com um elétron parado e não consegue vê-lo.

09 – Sim, pois com as leituras consegui entender melhor o princípio da incerteza e a teoria da relatividade, assim me ajudando na compreensão da física moderna.

10 – Tanto os vídeos como os textos ajudaram e ainda vão ajudar muito a compreensão da física moderna.

Aluno 36

01 – Sim, pois nos possibilitou aprofundar na história da Física Moderna, ou seja, aprendemos mais a teoria e sobre a utilidade da física em nosso cotidiano, o que acaba por facilitar o entendimento e até a resolução de contas.

02 – Sim, através da leitura de Alice no País do Quantum pude compreender muito mais o conteúdo. A explicação da teoria, que existe por trás das fórmulas que nos são apresentadas, proporcionou maior conhecimento e acabou por facilitar na compreensão e aplicação de exercícios de cálculos. Eu diria que foi um texto muito esclarecedor e facilitador.

03 – Sim, a física é muito complexa e de difícil compreensão, a utilização de textos, analogias e outros métodos facilitam o entendimento. Aprendi muito com a mescla de vídeo e literatura, uma complementou a outra e juntas foram bem explicativas e facilitadoras para a compreensão.

04 – A imaginação é tão importante para a literatura e história quanto para a física. Em ambas a imaginação é um fator importante para o desenvolvimento de novas ideias e métodos, no caso da física “abre horizontes” e possibilita novas descobertas.

05 – Sim, Alice no País do Quantum mostra exatamente isso, usa-se a literatura, a figura de linguagem, a analogia para explicar de maneira mais compreensível o assunto abordado, referente principalmente às partículas subatômicas.

06 – Ambas são importantes, e tratam de áreas distintas, mas eventualmente podem se associar.

07 – Sim, o uso da literatura que para estudar física é um grande aliado para quem tem mais facilidade em humanas.

08 – Podem ser consideradas modelos, pois “demonstram” e explicam algo, que não pode ser visto ou mostrado de fato.

09 – Sim, por exemplo, quando Alice vê os tijolos sendo jogados na construção desorganizada. Essa parte do texto ajuda na melhor compreensão do comportamento de partículas em termos de distribuição de probabilidades.

10 – Tanto o vídeo quanto o texto acabam se complementando e possibilitando diversas formas de abstrair o conteúdo.

Aluno 37

01 – Sim, com sua leitura pude ver o porquê da existência de cada coisa, e como surgiram, e isso foi de grande importância no meu entendimento.

02 – Sim, o método utilizado na alegoria foi bem didático e prazeroso, tornando uma leitura que poderia ser chata em legal, levando a uma melhor explicação.

03 – Sim, normalmente as pessoas não se atraem por temas que cansam e que são "maçantes". O uso de narrativas literárias ajudam por transformar uma leitura cansativa (obrigatória) em prazerosa (lazer).

04 – Sim, acho que em ambas as leituras. Como não há uma visualização concreta, a imaginação é de crucial importância.

05 – Sim, podemos ver paralelos na literatura e na ciência que são abstratos, como quando Alice reduz de Tamanho para entrar na tela da televisão.

06 – Não, pois a imaginação literária e poética normalmente não tem fundamento, já a científica sim.

07 – sim, a forma mais didática e dinâmica, ajudou a chegar em um entendimento mais rápido.

08 – Sim, pois mostra de forma mais interativa o que realmente existe e o que é molde.

09 – Sim, para tudo que vemos é necessário termos uma noção do conceito, para se saber o que fazer na prática.

10 – Sim. Ambos tem sua importância no entendimento, porém o vídeo me ajuda mais por podermos visualizar a “coisa”, aí fica mais fácil.

Aluno 38

01 – A leitura foi pertinente para a compreensão porque faz com que a pessoa tire suas próprias conclusões e possa discutir com outra, e assim, podendo haver um melhor entendimento. A leitura sempre ajuda a ter uma melhor interpretação sobre determinado assunto.

02 – Sim, porque a leitura é fundamental para melhor entendimento sobre o assunto.

03 – Sim, porque através de textos, figuras de linguagem, entre outros é que você imagina a situação citada no texto e abstrai os conceitos passados.

04 – Sim, pois a imaginação ajuda a abstrair o conceito passado. Para a física também é importante a imaginação porque você entende melhor.

05 – Sim, porque você acaba recriando algo diferente em sua mente.

06 – Sim, pois nas duas leituras se usa a imaginação e a criatividade.

07 – Sim, porque com o uso da imaginação e da criatividade fica mais fácil assimilar o texto, o assunto abordado.

08 – Sim, porque ele representa alguma coisa real que não sabemos como realmente é.

09 – Ajudou a entender os conceitos estudados, como o do tempo e espaço absolutos .

10 – Sim, os dois são importantes, o vídeo pelo uso de imagens pode ajudar bastante na melhor assimilação do conteúdo, e já a leitura por você usar a imaginação e a criatividade, mas deve-se tomar cuidado com interpretações erradas .

Aluno 39

01 – Sim, compreendi um pouco sobre a evolução da ciência.

02 – Sim, a forma que a física foi apresentada na obra Alice no País do Quantum, é uma forma muito bem explicada, aumentando, assim, o nosso interesse, já que é apresentada de uma forma prazerosa.

03 – Acredito que seja muito importante, tanto para a física, quanto para outras matérias, para melhor entendimento do assunto decorrido.

04 – Sim, na literatura usamos a imaginação para criarmos o cenário, as personagens e entre outras coisas. Na física é muito importante a imaginação na hora de resolver um problema, na visualização do enunciado e da resolução.

05 – Sim, isso está presente em nosso dia-a-dia, em filmes, livros, que mostram máquinas do tempo, robôs, anomalias nos seres vivos , aguçando a nossa imaginação e despertando o nosso interesse.

06 – Sim, a literatura científica é importante para ampliar, acrescentar, o nosso entendimento sobre o assunto.

07 – Sim. A literatura fez com que o meu entendimento sobre a física aumentasse, fazendo, assim, aumentar o meu gosto pela mesma.

08 – Sim, pois eles são exemplos usados para o nosso melhor entendimento.

09 – Sim, como o conceito de que matéria se comporta como partícula ou como onda.

10 – Sim, ambos são importantes, com a leitura podemos imaginar várias possibilidades e com os vídeos já explicados e com os conceitos prontos, faz com que termine de completar o nosso entendimento.

Aluno 40

01 – Sim, a leitura do livro me ajudou de certa forma, como complemento para o bom entendimento para a física moderna.

02 – É possível relacionar a física com a literatura para compreender os conceitos e as regra aplicadas em diversas situações.

03 – Sim, é necessário haver dependendo da matéria que se explica, podendo haver maior facilidade no entendimento e na prática.

04 – A imaginação é importante para ter uma noção de formar o que está sendo passado.

05 – Sim, porque a ciência no geral se apresenta nas duas dimensões, imaginativas e abstratas.

06 – Não, isso depende por serem estudos diferentes, porém estão relacionado um com o outro.

07 – Eu considerei bom o uso da literatura, para os conceitos físicos, pelo fato de aumentar e melhorar na hora de aplicar os conceitos.

08 – Podem ser um modelo a partir da física quântica que foi apresentado.

09 – Sim, por exemplo, o banco de elétrons.

10 – Os vídeos me ajudaram a ter um melhor entendimento dos conceitos estudados, a leitura eu acho que é mais importante pelo fato de explicar mais detalhadamente o que está sendo abordado.

Aluno 41

01 – Sim, nos ajudou a compreender em si as teorias da física moderna, mas também é um texto que engloba muitos aspectos juntos, deixando o texto mais pesado de se ler.

02 – Sim, o autor teve muita criatividade de unir uma literatura muito conhecida hoje em dia com conceitos mais complicados da física quântica. Assim como ele, outros autores poderiam fazer livros assim, para incentivar o aprendizado.

03 – Sim, a física em si é muito difícil o entendimento, principalmente para alguns, e leituras e vídeos são maneiras diferentes e divertidos de prender nossa atenção, já que apenas o professor falando é maçante e chato.

04 – Sim, para ambos. Na literatura a imaginação e a criatividade são necessárias para criar a história e na física para criação de modelos e ideias.

05 – Sim, assim como no livro Alice no País do Quantum, mostra que toda a criatividade imposta no livro é abstraída por nós e nos trás um entendimento mais claro.

06 – Na literatura a criatividade e a imaginação são mais fáceis de fluir, porque não é necessário se preocupar com as coisas que estão envolvidas, já a imaginação científica é algo mais complicado, que exige mais atenção e dedicação.

07 – Aproximei os conceitos pelos usos das analogias e aprofundamento da história fazendo prender minha atenção.

08 – Sim, são modelos dos conceitos que nos são difíceis de entender, fazendo com que nós imaginemos as analogias e assim absorvendo o conceito.

09 – Sim, principalmente o texto de Hobsbawm me fez associar coisas comuns do dia-a-dia com a física, coisa que eu nunca havia pensado.

10 – Sim, os vídeos foram um complemento ao que a leitura explicava a grosso modo. Apenas com a leitura ocorreria a compreensão, mas com os vídeos a compreensão é maior. Eu acho a leitura mais importante porque engloba mais aspectos.

Aluno 42

01 – Sim, pois nos pode dar uma base melhor sobre a física moderna na teoria, de um jeito diferente, abrangendo o tema de um modo mais complexo e interessante.

02 – Sim, pois como é mostrado no livro que há uma analogia entre a literatura e a física, pois apresenta vários temas dentro de uma história já conhecida, sendo apenas adaptada para o entendimento de uma maneira menos maçante e complexa.

03 – Sim, pois na física é necessário entendermos a parte teórica também, para depois aplicarmos na prática com um conhecimento sobre o conceito.

04 – Sim, tanto na literatura quanto na física, a imaginação é de grande importância para conseguirmos traduzir o nosso pensamento através de uma forma diferente, e tentar fazer os outros entenderem por conta própria, cada um com sua livre interpretação.

05 – Sim, como podemos ver, por exemplo, no livro Alice no País do Quantum, onde é mostrado através de analogia que a ciência pode ser contextualizada de um jeito diferente de como estamos acostumados, englobando a imaginação e a abstração.

06 – Sim, ambas imaginações querem te mostrar algo, e te fazer de alguma maneira entender e tirar um aproveitamento e uma interpretação própria do que foi explicado, seja na literatura ou na ciência.

07 – Sim, da forma que eu pude entender melhor como funcionam os conceitos estudados de uma forma mais descontraída, de uma forma onde eu pudesse fazer minha interpretação em cima do que me foi apresentado.

08 – Sim, pois o autor usa o livro, fazendo a analogia para tentarmos entender algo de certa forma abstrata, através desses modelos.

09 – Sim, as leituras de certa forma me ajudaram a organizar as ideias sobre os conceitos e ter um melhor entendimento da física moderna, como por exemplo, a superposição de estados quânticos, em que é mostrado no capítulo 3 do livro.

10 – Sim, os vídeos ajudaram também. Creio que ambos sejam importantes, porém a leitura permite que você faça sua própria interpretação, ao que foi apresentado, já o vídeo que traz uma interpretação pronta e própria, serve como um complemento para o entendimento do assunto abordado.

Aluno 43

01 – Sim, pois o texto fala sobre o início da física, engloba o conceito da física, se trata a história da física moderna, o conceito é base principal para entender a física moderna.

02 – Sim, pois no livro para Alice entender sobre o mundo do quantum, ela teve que fazer várias perguntas, pois tudo que acontecia no mundo do quantum ela não entendia, assim ela várias perguntas aos elétrons para tirar suas dúvidas .

03 – Sim, pois para entender a física é necessário explicar suas origens, explicar o que ela é realmente, através de desenhos, leituras e experimentos.

04 – É importante para a literatura e escrita de história, pois é com ela que surgem as histórias de romance, ação, ficção, etc. Para a física também é importante para a realização de experimentos e descobertas.

05 – Sim, pois quando lemos, imaginamos o cenário, os personagens através de nossa imaginação.

06 – É importante, pois tanto os autores quanto os cientistas se valem de muita imaginação.

07 – É bom o uso da literatura nos estudos físicos, pois foi através do livro Alice no País do Quantum que eu consegui esclarecer melhor alguns conceitos.

08 – Sim, pois o livro em si é um modelo do conceito da física quântica.

09 – Sim, pois o livro só foi um complemento da matéria explicada.

10 – Os vídeos ajudaram um pouco, pois para mim é a leitura que me garante abstrair os eventos ali escritos.

Aluno 44

01 – Sim, pois pudemos evidenciar pela leitura como os estudos da física moderna são importantes para a nossa sociedade.

02 – Aprendi muito mais com as leituras dos capítulos do livro, pois as dúvidas da Alice eram minhas, e foram muito bem respondidas.

03 – Considero sim que a leitura é proveitosa para a Física, pois ela nos tira dúvidas de conceitos que é de extrema importância saber.

04 – É sim, a imaginação ajuda no enredo das histórias ela proporciona que seja mais fácil entender os conceitos, que muitas vezes são duvidosos para nós.

05 – Sim, por meio da literatura é possível mostrar que a ciência tem características imaginativa e abstrata, por exemplo, o livro Alice no País do Quantum é abstrato e os lugares (banco de Heisenberg, sala de pensar) são imaginativos.

06 – As duas imaginações, tanto poéticas, quanto científicas possuem a mesma importância, porém para meios diferentes, um para tecnologia, e outro para cultura.

07 – Considero sim, nunca havia trabalhado a física com a literatura, e confesso que após as leituras tenho tido muito mais facilidade no entendimento e aplicação. E com isso me aproximei dos estudos da física.

08 – O que está no livro é um modelo do que é a física quântica, porque a criação de personagens falantes (elétrons) é apenas um modelo, pode até ser fictício, porém tudo isso é para que haja um melhor aproveitamento da leitura.

09 – Sim, após a leitura do livro entendi muito sobre relatividade, que também foi explicada em sala.

10 – Os vídeos ajudaram a formação do meu entendimento, porque a visualização é uma maneira muito mais fácil de entender certos conceitos. Sinceramente, eu prefiro a leitura porque ela te envolve, te faz imaginar, viaja junto o que faz entender melhor.

Aluno 45

01 – Sim, foi importante para mostrar uma introdução sobre a matéria que foi aplicada.

02 – Sim, pois com a leitura, houve outros meios de interpretações e aprendizado sobre a matéria.

03 – Sim, pois são outros meios de interpretar as mesmas coisas.

04 – Sem a imaginação e a vontade de ultrapassar os limites humanos, jamais viveríamos a era atual.

05 – Sim, pois como pensar sem imaginação?

06 – Sim, pois ambas tem a mesma base (a imaginação).

07 – Sim, começou a me mostrar a física vista com mais conceitos.

08 – Sim, pois com as analogias, percebemos a mesma coisa de modos diferentes.

09 – Não somente uma vaga ideia, como uma ampla visão dos fatos estudados. Como Alice conversando com as personagens (elétrons) e nunca vendo suas faces (princípio da incerteza).

10 – Sim, o vídeo que mostra dando exemplos, o que ajuda muito a compreender o que realmente acontece.

Aluno 46

01 – Sim, pois assim conseguimos ter um entendimento bem melhor com essa introdução.

02 – Sim, pois com o livro conseguimos entender melhor, já que a matéria é difícil e com o livro conseguiu explicar bastante a física colocando-a com exemplos maravilhosos.

03 – Sim, pois são outros meios de aprendizagem. Quanto mais variados os meios de estudos, melhor serão o nosso aprendizado e conhecimento.

04 – Para ambos são importantes. Para conseguirmos ter um aprendizado melhor devemos ter uma imaginação. Fazendo uma suposição do momento, do que está acontecendo no exercício dado de física, por exemplo, também é importante a imaginação para compreendermos melhor as teorias da física.

05 – Sim, é possível, pois a literatura já instiga a imaginação, e logo estaremos usando essa imaginação nos estudos.

06 – Sim, as duas tem a mesma importância.

07 – Eu considere muito bom o uso da literatura na física, pois como já dito, foi outro meio de aprender a teoria da física moderna, me mostrou uma física mais conceitual.

08 – Sim, pois o modelo seria uma simulação que necessariamente, pode não ser real. E com as analogias podemos perceber coisas de uma maneira diferente.

09 – A utilização das leituras na sala de aula conseguiu me fornecer um ótimo aprendizado sobre o assunto. Fiquei muito satisfeita com o resultado. No livro Alice no País do Quantum, lendo sozinha e depois com a ajuda do professor e seus comentários foi de grande ajuda.

10 – Sim, o vídeo dá exemplos, que nos ajudam a compreender o que realmente acontece na realidade, o que foi muito importante para todos da sala.

ANEXO V

QUESTIONÁRIO SOBRE CONTEÚDOS DE FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA

01 - Antes mesmo de ter uma ideia mais correta do que é a luz, o homem percebeu que ela era capaz de percorrer muito depressa enormes distâncias. Tão depressa que levou Aristóteles - famoso pensador grego que viveu no século IV a.C. e cujas obras influenciaram todo o mundo ocidental até a Renascença - a admitir que a velocidade da luz seria infinita.

(GUIMARÃES, L. A.; BOA, M. F. "Termologia e óptica". São Paulo: Harbra, 1997. p. 177).

Hoje se sabe que a luz tem velocidade de aproximadamente 300.000 km/s, que é uma velocidade muito grande, porém finita. A teoria moderna que admite a velocidade da luz constante em qualquer referencial e, portanto, torna elásticas as dimensões do espaço e do tempo é:

- a) a teoria da relatividade
- b) a teoria da dualidade onda – partícula
- c) a teoria atômica de Bohr
- d) o princípio de Heisenberg
- e) a lei da entropia.

02 - Entre outras consequências, a teoria da relatividade de Einstein, poria fim à ideia do éter, meio material necessário, semelhantemente ao som, através do qual a luz se propagava. O jargão popular "tudo é relativo" certamente não se deve a ele, pois seus postulados estão fundamentados em algo absoluto: a velocidade da luz no vácuo – 300.000 km/s.

Hoje sabe-se que:

I. O som propaga-se no vácuo.

II. A luz propaga-se no vácuo.

III. A velocidade da luz no vácuo é a velocidade limite do universo.

É (são) verdadeira(s):

- a) todas
- b) nenhuma
- c) somente II
- d) II e III
- e) somente III

03 - Com o advento da Teoria da Relatividade de Einstein, alguns conceitos básicos da física newtoniana, entre eles, o espaço e o tempo, tiveram de ser revistos. Qual a diferença substancial desses conceitos para as duas teorias?

Alternativas	Física newtoniana		Teoria da relatividade	
	espaço	tempo	espaço	tempo
a)	Absoluto	Absoluto	Dilata	Contraí
b)	Dilata	Absoluto	Contraí	Dilata
c)	Absoluto	Contraí	Dilata	Absoluto

d)	Absoluto	Absoluto	Contraí	Dilata
e)	Contraí	Dilata	Absoluto	absoluto

04 – A noção de que o tempo se acelera ou desacelera dependendo da velocidade com que um objeto se desloca relativamente a outro certamente está entre as ideias mais ousadas de Albert Einstein.

O termo “dilatação do tempo” foi cunhado para descrever a desaceleração do tempo provocada pelo movimento. Para ilustrar o efeito, Einstein propôs um exemplo, conhecido por paradoxo dos gêmeos. Nesse suposto paradoxo, um dos gêmeos viaja quase com a velocidade da luz para uma estrela distante e volta à Terra.

De acordo com a teoria da relatividade, quando voltar para Terra esse gêmeo:

- a) apresentará a mesma idade de seu irmão, pois são gêmeos.
- b) aparentará estar mais velho devido ao desgaste de uma viagem tão longa.
- c) estará mais jovem que seu irmão que ficou na Terra, pois o tempo se dilatou.
- d) estará mais velho que seu irmão que ficou na Terra, pois o tempo se dilatou.
- e) nenhuma das anteriores.

05 – O quadro de Salvador Dali “A persistência da memória” representada abaixo data de 1934. Esta pintura traduz o interesse do pintor pelas conquistas da ciência moderna, cruzando teorias mais abstratas da física, nomeadamente _____, que colocou em causa a ideia de espaço e tempo fixos, com as pesquisas de Freud relativamente ao inconsciente e à importância dos fenômenos dos sonhos. Na tela encontram-se representados três relógios que marcam diferentes horas tendo como fundo a paisagem de Porto Lligat, localizado no norte de Espanha. A duplicidade de sentido das imagens e as inúmeras interpretações que promovem assim como a tendência para a criação de cenas absurdas repletas de signos indecifráveis levaram a Dali a designar esta forma de arte de crítica paranoica, em tudo oposta a uma visão racional do mundo.

A teoria que completa a lacuna trata-se da(o):

- a) Relatividade de Einstein
- b) colapso do ultravioleta
- c) corpo negro
- d) superposição
- e) big-bang

06 - Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas do texto abaixo:

Segundo a interpretação vigente, a radiação eletromagnética tem uma natureza bastante complexa. Em fenômenos como interferência e difração, por exemplo, ela apresenta um comportamento..... Em processos de emissão e absorção, por outro lado, ela pode apresentar comportamento....., sendo, nesses casos, descrita por “pacotes de energia” (fótons) que se movem no vácuo com velocidade $c \approx 300.000 \text{ km/s}$ e têm massa de repouso.....

- a) ondulatório – ondulatório – nula
- b) ondulatório – corpuscular – nula
- c) corpuscular – ondulatório – diferente de zero
- d) corpuscular – corpuscular – nula
- e) ondulatório – corpuscular – diferente de zero

07 - Com base nos tópicos de Física Moderna estudados, assinale a(s) proposição(ões) **CORRETA(S)** e assinale a alternativa que contem a sua soma.

01. Corpo negro ideal é todo corpo capaz de absorver toda a radiação que nele incide. Quando um corpo negro é aquecido, ele é uma fonte ideal de radiação térmica.

02. O efeito fotoelétrico só ocorre se a intensidade da luz incidente sobre o metal for alta e a emissão de cargas elétricas deste material independe da frequência da radiação incidente.

04. A Teoria da Relatividade Especial, proposta por Einstein, está baseada em dois postulados, sendo que um deles é enunciado da seguinte forma: “*As leis da Física são as mesmas em todos os referenciais inerciais. Ou seja, não existe nenhum sistema de referência inercial preferencial*”.

08. A apresentação do trabalho do físico Maxwell sobre a quantização da energia é considerada hoje como o marco oficial da fundação da Física Moderna.

16. A Teoria da Relatividade Restrita tem como consequência a contração espacial e a dilatação temporal.

32. O fenômeno da radiação do corpo negro é explicado pela Física Clássica e pela Moderna como sendo uma distribuição contínua de energia de um sistema.

64. O comportamento dualístico de uma onda-partícula é descrito e aceito pela Física Clássica, sendo mais aprofundado e explicado pela Física Quântica.

- a) 15 b) 14 c) 24 d) 48 e) 21

08 – Em fins do século XIX, William Thomson, conhecido mais por Lorde Kelvin, um dos mais destacados e respeitados físicos da época, fazendo uma avaliação da situação da Física, afirmou que todos os problemas já haviam sido resolvidos: “No céu azul da física existem apenas duas nuvens a serem dirimidas”. O que Lorde Kelvin não sabia, era que essas duas nuvens se transformariam em tempestades, formando uma nova física, denominada atualmente como física quântica.

As duas nuvens a que Kelvin se referira eram dois problemas sem solução para época, assinale a alternativa que os contenham.

- a) a geração de 100 % de energia em uma máquina térmica e a difração da luz;
- b) a questão do éter e do corpo negro;
- c) o problema da radiação eletromagnética e a queda dos corpos;
- d) o ângulo de curvatura horizontal e vertical para alcances máximos;

e) a construção de máquinas mais potentes e do aquecimento global.

09 – A natureza da luz já foi discutida por séculos entre os cientistas. Newton a considerava uma partícula, enquanto Huygens, seu contemporâneo, postulava-a como uma onda. Os primeiros experimentos capazes de determinar a característica ondulatória e corpuscular (feita de partículas) da luz foram realizados, também, em séculos diferentes, o primeiro em 1801, por Thomas Young, e o segundo em 1905 por Albert Einstein.

Os experimentos citados são denominados como:

- a) medida de uma altura pela sombra projetada e radiação do corpo negro;
- b) decomposição da luz solar em um prisma e radiação do corpo negro;
- c) comprovação da inexistência do éter e espalhamento beta;
- d) paradoxo da incerteza e relatividade geral;
- e) dupla fenda e efeito fotoelétrico.

10 - Entre as inovações da Física que surgiram no início do século XX, uma foi o estabelecimento da teoria _____, que procurou explicar o surpreendente resultado apresentado pela radiação e pela matéria conhecido como dualidade entre _____ e ondas. Assim, quando se faz um feixe de elétrons passar por uma dupla fenda de largura micrométrica, o efeito observado é o comportamento _____ da matéria, e quando fazemos um feixe de luz incidir sobre uma placa metálica, o efeito observado pode ser explicado considerando a luz como um feixe de _____.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência correta de palavras para o preenchimento das lacunas nas frases acima.

- a) Relativística – partículas – ondulatório – partículas.
- b) Atomística – radiação – rígido – ondas.
- c) Quântica – partículas – ondulatório – partículas.
- d) Relativística – radiação – caótico – ondas.
- e) Quântica – partículas – ondulatório – ondas.

11 - Leia a tirinha a seguir.

Disponível em: <<http://www.cbpf.br/~eduhq/html/tirinhas/>>. Acesso em: 25 ago. 2008.

Para validar a proposta do analista, ocorrência da dualidade onda-partícula, o senhor Fóton deve ser capaz de sofrer:

- a) interferência e refração.
- b) interferência e polarização.
- c) difração e efeito fotoelétrico.
- d) efeitos fotoelétrico e compton.
- e) polarização e ressonância

12 - Em 1926, Louis de Broglie formula, na sua tese de doutorado, que as partículas deveriam se comportar como ondas. A hipótese de Broglie foi confirmada experimentalmente de forma independente por Davisson e Germer, em experiências realizadas usando elétrons onde a difração de partículas foi observada pela primeira vez. Nestes experimentos, as partículas incidem em uma rede de difração, que consiste de uma série de fendas do mesmo comprimento localizadas a uma distância igualmente espaçada, conhecida como espaçamento da rede. O comprimento da fenda deve ser comparável com o comprimento da onda incidente.

Em sua teoria De Broglie considerou, pelo princípio da simetria da natureza, que a matéria apresentava:

- a) características luminosas
- b) caráter dual
- c) aspectos sonoros
- d) efeito doppler
- e) características rígidas.

13 – O célebre historiador Hobsbawm, em seu livro *A Era dos Extremos*, no capítulo XVIII – Feiticeiros e aprendizes, ressalta que o aprendiz de feiticeiro não mais precisa do seu mestre. Alertando-nos, com a analogia, que o ser humano do século 20 não precisava conhecer a ciência por trás da tecnologia que usava, pois ela já vinha pronta, bastando saber apertar alguns botões. Além dessa contradição, o autor aponta, também, o conflito pelo qual os cientistas passaram com o desaparecimento das certezas da física clássica, tais como a determinação da posição e velocidade das partículas, como os elétrons, para os quais não havia mais posição e velocidades bem determinadas.

A teoria que evidencia essa passagem está bem explicada pelo(a):

- a) o princípio de incerteza de Heisenberg
- b) o princípio de exclusão de Pauling
- c) o paradoxo do gato de Schrödinger
- d) a quantização de Planck
- e) a relatividade de Einstein

14 – Niels Bohr, ao se deparar com as estranhezas da física quântica, mais detalhadamente sobre a mecânica quântica, teria dito que: “qualquer um que não se choque com a Mecânica Quântica é porque não a entendeu”. Na mesma linha de pensamento Werner Heisenberg dizia: “o quantum é essencialmente a ciência além do sentido. Não é possível ter qualquer imagem da realidade final”.

As duas frases podem ser explicadas no assombro que a mecânica quântica causa aos nossos sentidos, por ser tão diferente da nossa percepção. Assinale abaixo o que poderia sintetizar esse assombro:

- a) a inexistência comprovada do éter
- b) os elétrons arrancados de uma placa de metal pelo efeito fotoelétrico
- c) a radiação do corpo negro

d) a superposição de estados quânticos de uma partícula, que impede uma verificação possível de sua localização.

e) O princípio de exclusão de Pauling que afirma ser impossível dois férmions ocuparem o mesmo estado quântico.

15 - A teoria quântica descreve o comportamento de partículas em termos de distribuições de probabilidade, e a observação real de partículas individuais ocorre aleatoriamente dentro destas distribuições. A figura ilustra a teoria:

(Alice no país do Quantum, p 20).

Assinale a alternativa que melhor explica a distribuição de probabilidades.

- a) é um arremesso a esmo de probabilidades da realidade, denominado chute.
- b) representa a sorte, como no jogo de dados que pode dar seis ou um.
- c) constitui uma possível determinação da posição de um elétron, dada em possibilidades de verificação aleatórias dentro das distribuições.
- d) nos traduz a exata posição do elétron e sua velocidade.
- e) indica somente a probabilidade do observador de verificar onde se encontra uma partícula.

16 – A quântica trata dos eventos ocorridos em escalas atômicas, nesse mundo, nossos sentidos não retratam a realidade dos fatos. Um exemplo é o que ocorre com o papel do observador em um experimento, pois quando se tenta realizar a observação o experimento muda.

A figura ilustra o fenômeno da difração, os elétrons atravessam uma dupla fenda, criando padrões de interferência (fenômeno ondulatório da difração), a personagem ao tentar observar por qual das fendas os elétrons passam, acaba interferindo e o que se constata no anteparo atrás das fendas será:

(Alice no País do Quantum, p. 51).

- a) o colapso da função de onda, o padrão de interferência desaparece e atrás das fendas surgem apenas duas riscas verticais, que indicam o caráter corpuscular dos elétrons.
- b) a continuidade do padrão de interferência (franjas), mantendo-se a difração dos elétrons, que indicam o caráter ondulatório dos elétrons.
- c) o desaparecimento da difração e o surgimento da polarização;
- d) a continuidade das franjas de interferência que representam o caráter corpuscular dos elétrons.
- e) o desaparecimento dos pontos claros (franjas) e apenas a verificação de interferências destrutivas.

Leia o texto para responder a próxima questão

Irwin Schrödinger desenvolveu um experimento gedanken (experimento de pensamento) em que um pobre gato ficava preso numa caixa, junto com um recipiente de gás venenoso e um mecanismo que quebraria o frasco caso uma amostra de um material radioativo viesse sofrer um decaimento. Tal decaimento é definitivamente um processo quântico. O material pode ou não decair e então, de acordo com as regras da física quântica, haveria uma superposição de estados, onde em alguns o decaimento teria ocorrido e em outros, não. É claro que, naqueles estados em que o decaimento ocorresse, o gato morreria, e nós então teríamos uma superposição de estados de gato, alguns mortos e alguns vivos. Quando a caixa fosse aberta, alguém observaria o gato e dali em diante ele estaria morto ou vivo. A questão proposta por Schrödinger era: "Qual o estado do gato antes de a caixa ser aberta"? (Alice no País do Quantum, p. 54).

17 – Assinale a alternativa que representa a correta explicação sobre superposição de estados quânticos.

- a) representa o estado das pessoas com doenças terminais, estando meio vivas ou mortas.
- b) indica tão somente a possibilidade de uma partícula estar em dois ou mais estados quânticos ao mesmo tempo.
- c) é uma verificação da realidade observada no nosso dia a dia.
- d) a superposição é a prova da dualidade da luz.
- e) é a capacidade do elétron apresentar o fenômeno da difração.

GABARITO

01 – A	02 – D	03 – D	04 – C	05 – A	06 – B
07 – E	08 – B	09 – E	10 – C	11 – C	12 – B
13 – A	14 – D	15 – C	16 – A	17 - B	

FEITICEIROS E APRENDIZES

As ciências naturais

Você acha que há lugar para a filosofia no mundo de hoje?

Claro, mas só se for baseada no atual estado de conhecimento e realidade científicos [...] Os filósofos não podem isolar-se contra a ciência. Ela não apenas ampliou e transformou enormemente nossa visão da vida e do universo: também revolucionou as regras segundo as quais opera o intelecto.

Claude Lévi-Strauss (1988)

O texto padrão sobre a dinâmica do gás escrito pelo autor quando desfrutava de uma bolsa da Fundação Guggenheim foi por ele descrito como tendo tido sua forma ditada pelas necessidades da indústria. Dentro desse esquema, a confirmação da teoria da relatividade geral de Einstein passou a ser vista como um passo crítico para melhorar "a precisão da balística militar levando-se em conta minúsculos efeitos gravitacionais". A física do pós-guerra estreitou cada vez mais sua concentração nas áreas julgadas como de aplicações militares.

Margaret Jacob (1993, pp. 66-7)

I

Nenhum período da história foi mais penetrado pelas ciências naturais nem mais dependente delas do que o século xx. Contudo, nenhum período, desde a retratação de Galileu, se sentiu menos à vontade com elas. Este é o paradoxo que tem de enfrentar o historiador do século. Mas, antes que eu tente fazê-lo, devem-se reconhecer as dimensões do fenômeno.

Em 1910, todos os físicos e químicos alemães e britânicos juntos chegavam talvez a 8 mil pessoas. Em fins da década de 1980, o número de cientistas e engenheiros de fato empenhados em pesquisa e desenvolvimento experimental no mundo era estimado em cerca de 5 milhões, dos quais quase 1 milhão se achava nos EUA, principal potência científica, e um número ligeiramente maior

nos Estados da Europa.* Embora os cientistas continuassem a formar uma minúscula fração da população, mesmo nos países desenvolvidos, o número deles continuou a crescer de maneira impressionante, mais ou menos dobrando nos vinte anos após 1970, mesmo nas economias avançadas. Contudo, em fins da década de 1980 eles formavam a ponta de um *iceberg* muito maior do que se poderia chamar de mão-de-obra científica e tecnológica potencial, que refletia essencialmente a revolução educacional da segunda metade do século (ver capítulo 10). Ela representava talvez 2% da população global, e talvez 5% da população norte-americana (UNESCO, 1991, tabela 5.1). Os cientistas de fato eram cada vez mais selecionados por meio de uma "tese doutoral", que se tornou o bilhete de entrada para a profissão. No fim da década de 1980, o país ocidental avançado típico gerava alguma coisa do tipo 130, 140 desses doutorados por ano para cada milhão de seus habitantes (Observatoire, 1991). Esses países também gastavam, sobretudo dos fundos públicos — mesmo nos países mais capitalistas —, somas bastante astronômicas em tais atividades. Na verdade, as formas mais caras de "grande ciência" estavam fora do alcance de qualquer país individualmente a não ser (até a década de 1990) os EUA.

Mas havia uma grande novidade. Apesar de 90% dos trabalhos científicos (cujo número duplicava a cada dez anos) serem publicados em quatro idiomas (inglês, russo, francês e alemão), a ciência eurocêntrica se encerrou no século xx. A Era das Catástrofes, e sobretudo o triunfo temporário do fascismo, transferiu seu centro de gravidade para os EUA, onde permaneceu. Entre 1900 e 1933, só sete Prêmios Nobel de ciência foram dados aos EUA; mas, entre 1933 e 1970, foram 77. Os outros países de colonização européia também se estabeleceram como centros de pesquisa independentes — Canadá, Austrália, muitas vezes subestimada Argentina** —, embora alguns, por questões de tamanho e política, exportassem a maioria de seus cientistas (Nova Zelândia, África do Sul). Ao mesmo tempo, foi impressionante o surgimento de cientistas não europeus, sobretudo do Leste Asiático e do subcontinente indiano. Antes do fim da Segunda Guerra Mundial, só um asiático conquistara um Prêmio Nobel de ciência (C. Raman, em física, 1930); depois de 1946, tais prêmios foram concedidos a mais de dez pesquisadores com nomes obviamente japoneses, indianos e paquistaneses, e isso ainda subestima tão claramente a ascensão das ciências asiáticas quanto o registro pré-1933 subestimava a ascensão da ciência americana. Contudo, no fim do século, ainda havia partes do mundo que geravam visivelmente poucos cientistas em termos absolutos, e ainda mais acentuadamente em termos relativos, como por exemplo a África e a América Latina. Contudo, um fato impressionante é que (pelo menos) um terço dos lau-

(*) O número ainda maior na então URSS (cerca de 1,5 milhão) provavelmente não era de todo comparável (UNESCO, 1991, tabelas 5.2, 5.4 e 5.16).

(**) Três Prêmios Nobel, todos desde 1947.

reados asiáticos não aparece representando seu país de origem, mas como cientistas americanos. (Na verdade, dos laureados americanos, 27 são imigrantes de primeira geração.) Pois, num mundo cada vez mais globalizado, o fato mesmo de as ciências naturais falarem uma única língua universal e operarem sob uma única metodologia ajudou paradoxalmente a concentrá-las nos relativamente poucos centros com recursos adequados para seu desenvolvimento, isto é, nuns poucos Estados ricos altamente desenvolvidos, e acima de tudo nos EUA. Os cérebros do mundo, que na Era das Catástrofes fugiram da Europa por motivos políticos, desde 1945 foram drenados dos países pobres para os ricos por motivos sobretudo econômicos.* Isso é natural, pois nas décadas de 1970 e 1980 os países capitalistas desenvolvidos gastaram quase três quartos de todos os orçamentos do mundo em pesquisa e desenvolvimento, enquanto os pobres ("em desenvolvimento") não gastaram mais de 2% a 3% (UN World Social Situation 1989, p. 103).

Contudo, mesmo no mundo desenvolvido, a ciência foi aos poucos perdendo dispersão, em parte por causa da concentração de pessoas e recursos — por razões de eficiência — em parte porque o enorme aumento na educação superior inevitavelmente criou uma hierarquia, ou antes uma oligarquia entre seus institutos. Nas décadas de 1950 e 1960, metade dos doutorados nos Estados Unidos vinha das quinze universidades mais prestigiosas, para as quais, em consequência, acorriam os jovens cientistas mais capazes. Num mundo democrático e populista, os cientistas eram uma elite, concentrada nuns relativamente poucos centros subsidiados. Como espécie, ocorriam em grupos, pois a comunicação ("alguém com quem conversar") era fundamental para suas atividades. Com o passar do tempo, essas atividades foram se tornando cada vez mais incompreensíveis para os não-cientistas, embora os leigos tentassem desesperadamente entendê-las, com a ajuda de uma vasta literatura de popularização, às vezes escrita pessoalmente pelos melhores cientistas. Na verdade, à medida que aumentava a especialização, mesmo os cientistas precisavam de cada vez mais publicações para explicar uns aos outros o que se passava fora de seus respectivos campos.

O fato de que o século XX dependeu da ciência dificilmente precisa de prova. A ciência "avançada", quer dizer, aquele conhecimento que não pode nem ser adquirido pela experiência diária, nem praticado ou mesmo compreendido sem muitos anos de escola, culminando numa formação de pós-graduação esotérica, tinha apenas uma gama relativamente estreita de aplicações práticas até o fim do século XIX. A física e a matemática do século XVII gover-

(*) Pode-se notar um pequeno dreno temporário para fora dos EUA durante os anos macaristas, e fugas políticas ocasionais maiores da região soviética (Hungria, 1956; Polónia e Tchecoslováquia, 1968; China e URSS, no fim da década de 1980), além de um dreno constante da República Democrática Alemã para a Alemanha Ocidental.

navam os engenheiros, enquanto em meados do reinado de Vitória as descobertas elétricas e químicas de fins do século XVIII e inícios do XIX já eram essenciais à indústria e às comunicações, e as explorações de pesquisadores científicos profissionais eram reconhecidas como a ponta-de-lança necessária do próprio avanço tecnológico. Em suma, a tecnologia com base na ciência já se achava no âmago do mundo burguês do século XIX, embora as pessoas práticas não soubessem exatamente o que fazer com os triunfos da teoria científica, a não ser, nos casos adequados, transformá-las em ideologias: como o século XVIII fizera com Newton e o final do século XIX com Darwin. Apesar disso, vastas áreas da vida humana continuaram sendo governadas, em sua maioria, pela experiência, experimentação, habilidade, bom senso treinado e, na melhor das hipóteses, difusão sistemática de conhecimento sobre as melhores práticas e técnicas existentes. Foi visivelmente o que aconteceu com a agricultura, construção civil e medicina, e na verdade com uma vasta gama de atividades que proporcionavam aos seres humanos suas necessidades e luxos.

Num determinado momento, no último terço do século, isso começou a mudar. Na Era dos Impérios, começaram a tornar-se visíveis não apenas os contornos da moderna tecnologia — só é preciso pensar nos automóveis, aviação, rádio e cinema — mas também os da moderna teoria científica: relatividade, o quantum, a genética. Além disso, via-se agora que as mais esotéricas e revolucionárias descobertas da ciência tinham potencial tecnológico imediato, da telegrafia sem fio ao uso médico dos raios X, ambos baseados em descobertas da década de 1890. Apesar disso, embora a grande ciência do Breve Século XX já fosse visível em 1914, e embora a alta tecnologia posterior já estivesse implícita nela, a grande ciência ainda não era uma coisa sem a qual a vida diária *em toda parte* do globo seria inconcebível.

É o que ocorre quando o milênio chega ao seu final. Como vimos (capítulo 9), a tecnologia com base em avançadas teoria e pesquisa científicas dominou o *boom* econômico da segunda metade do século XX, e não mais apenas no mundo desenvolvido. Sem a última palavra em genética, a Índia e a Indonésia não poderiam ter produzido alimentos suficientes para suas populações em explosão, e no fim do século a biotecnologia se tornara um elemento importante tanto na agricultura quanto na medicina. O problema dessas tecnologias é que se baseavam em descobertas e teorias tão distantes do mundo do cidadão comum, mesmo dos países desenvolvidos mais sofisticados, que só algumas dezenas ou, no máximo, algumas centenas de pessoas no mundo podiam captar inicialmente que elas tinham implicações práticas. Quando o físico alemão Otto Hahn descobriu a fissão nuclear, no início de 1939, mesmo alguns dos cientistas mais ativos no campo, como o grande Niels Bohr (1885-1962), duvidavam de que tivesse alguma aplicação prática na paz ou na guerra, pelo menos no futuro previsível. E se os físicos que entendiam seu potencial não tivessem falado a seus generais e políticos, estes sem dúvida teriam continuado na

ignorância, a menos que fossem eles próprios físicos com pós-graduação, o que era muito improvável. Também o famoso trabalho de Alan Turing em 1935, que iria fornecer a base da moderna teoria do computador, foi escrito originalmente como uma exploração especulativa para lógicos matemáticos. A guerra lhe deu, e a outros, a oportunidade de traduzir a teoria nos primórdios de uma prática para decifração de códigos, mas quando foi publicado ninguém, com exceção de uns poucos matemáticos, sequer leu, quanto mais tornou conhecimento do seu trabalho. Mesmo em sua própria faculdade, o gênio de ar desajeitado e rosto pálido, então um professor assistente com queda pelo *jogging*, que se tornou postumamente uma espécie de ícone entre os homossexuais, não era uma figura de qualquer destaque; pelo menos não o lembro como tal.* Mesmo quando os cientistas se achavam visivelmente empenhados em tentar resolver problemas de reconhecida importância capital, só um pequeno punhado de cérebros num isolado canto intelectual sabia o que eles estavam preparando. Assim, este autor foi bolsista de uma faculdade em Cambridge na mesma época em que Crick e Watson preparavam sua triunfante descoberta da estrutura do DNA (a "Dupla Hélice"), imediatamente reconhecida como uma das conquistas fundamentais do século. Contudo, embora eu até me lembre de ter conhecido socialmente Crick na época, a maioria de nós simplesmente não sabia que esses fatos extraordinários estavam sendo maquiados a umas poucas dezenas de metros dos portões de minha faculdade, em laboratórios pelos quais passávamos regularmente e *pubs* onde bebíamos. Não é que não nos interessássemos por essas questões. Os que as pesquisavam simplesmente não viam sentido em falar-nos delas, uma vez que não podíamos contribuir para o seu trabalho, nem sequer, provavelmente, entender quais eram os seus problemas.

Apesar disso, por mais esotéricas e incomprensíveis que fossem as inovações da ciência, assim que eram feitas se traduziam quase imediatamente em tecnologias práticas. Assim, os transistores surgiram como um subproduto de pesquisas na física do estado sólido, isto é, as propriedades eletromagnéticas de cristais ligeiramente imperfeitos, em 1948 (seus inventores receberam o

(*) Turing suicidou-se em 1954, após ser condenado por conduta homossexual, então oficialmente crime e tida como uma doença médica ou psicologicamente curável. Ele não suportou a "cura" compulsória que lhe foi imposta. Foi vítima não tanto da criminalização do homossexualismo (masculino) na Grã-Bretanha antes da década de 1960 quanto de sua própria recusa a reconhecê-la. Suas tendências sexuais não haviam criado qualquer problema no ambiente de internato escolar no King's College, em Cambridge, nem entre a notória coleção de anônimos e excêntricos do *establishment* de decifração de códigos da época da guerra em Bletchley, onde ele passara a vida antes de ir para Manchester depois da guerra. Só um homem que não reconhecia exatamente o mundo em que a maioria das pessoas vivia iria à polícia dar queixa de um namorado (temporário) que roubara seu apartamento, com isso dando à lei a oportunidade de pegar ao mesmo tempo dois delinquentes legais.

Prêmio Nobel oito anos depois), como aconteceu com os *lasers* (1960), que vieram não de estudos ópticos, mas de trabalhos para fazer moléculas vibrarem em ressonância com um campo magnético (Bernal, 1967, p. 563). Seus inventores também foram logo reconhecidos com Prêmios Nobel, como o foi — tardiamente — o físico de Cambridge soviético Peter Kapitsa (1978), pelo trabalho em física de baixa temperatura que produziu os supercondutores. A experiência de pesquisa do tempo da guerra, em 1939-46, que demonstrou — pelo menos aos anglo-americanos — que uma esmagadora concentração de recursos podia resolver os mais difíceis problemas tecnológicos num tempo improvavelmente curto,* estimulou o pioneirismo científico, independentemente de custos, para fins bélicos ou de prestígio nacional (por exemplo, a exploração do espaço cósmico). Isso, por sua vez, acelerou a transformação da ciência de laboratório em tecnologia, parte da qual revelou ter um amplo potencial para o uso diário. Os *lasers* são um exemplo dessa rapidez. Vistos pela primeira vez em laboratório em 1960, tinham em inícios da década de 1980 chegado ao consumidor em forma de *compact disc*. A biotecnologia foi ainda mais rápida. As técnicas de DNA recombinante, ou seja, técnicas para combinar genes de uma espécie com os de outra, foram reconhecidas pela primeira vez como adequadamente práticas em 1973. Menos de vinte anos depois, a biotecnologia era uma coisa comum no investimento médico e agrícola.

Além disso, graças em grande parte à espantosa explosão de teoria e prática da informação, novos avanços científicos foram se traduzindo, em espaços de tempo cada vez menores, numa tecnologia que não exigia qualquer compreensão dos usuários finais. O resultado ideal era um conjunto de botões ou teclado inteiramente à prova de erro, que requeria apenas apertar-se no lugar certo para ativar um procedimento que se movimentava, se corrigia e, até onde possível, tomava decisões, sem exigir maiores contribuições das qualificações e inteligência limitadas e inconfiáveis do ser humano médio. Na verdade, idealmente, podia-se programar o procedimento para dispensar de todo a intervenção humana, a não ser quando alguma coisa dava errado. A cobrança nos caixas dos supermercados na década de 1990 tipificava essa eliminação do elemento humano. Não exigia do operador humano mais que reconhecer as cédulas e moedas do dinheiro local e registrar a quantidade entregue pelo cliente. Um *scanner* automático traduzia o código de barras do artigo num preço, somava todos os preços, deduzia o total da quantia entregue pelo cliente, e dizia ao operador quanto dar de troco. O procedimento para assegurar o desempenho de todas

(*) Em essência, hoje está claro que a Alemanha nazista não conseguiu fazer uma bomba nuclear não porque os cientistas alemães não soubessem fazê-la, ou não tentassem, com diferentes graus de relutância, mas porque a máquina de guerra alemã não quis ou não pôde dedicar-lhe os recursos necessários. Eles abandonaram a tentativa e passaram para o que parecia uma concentração mais efetiva em termos de custos, os foguetes, que prometiam retornos mais rápidos.

essas atividades é extraordinariamente complexo, pois se baseia numa combinação de maquinaria enormemente sofisticada e programação bastante elaborada. Contudo, a menos ou até que alguma coisa desse errado, esses milagres de tecnologia científica de fins do século XX não exigiam mais dos operadores que o reconhecimento dos números cardinais, um mínimo de atenção e uma capacitação. Para a maioria dos operadores, as forças que o mandavam informar ao cliente que ele ou ela devia pagar 2,15 libras, e o instruíam a devolver 7,85 de troco para uma nota de dez, eram tão irrelevantes quanto incompreensíveis. Não precisavam entender nada delas para operá-las. O aprendiz de feiteiro não precisava mais preocupar-se com sua falta de conhecimento.

Para fins práticos, a situação do operador de *check-out* do supermercado representava a norma humana de fins do século XX; os milagres da tecnologia científica de vanguarda, que não precisamos entender nem modificar, mesmo que saibamos, ou julgamos saber, o que está acontecendo. Outra pessoa o fará ou já fez por nós. Pois, mesmo que nos supúnhamos especialistas num ou outro campo determinado — ou seja, o tipo de pessoa que pode consertar o aparelho se der problema, ou projetá-lo, ou construí-lo —, diante da maioria dos outros produtos diários da ciência e tecnologia somos leigos ignorantes sem compreender nada. E mesmo que não fôssemos, nossa compreensão do que é que faz a coisa que usamos funcionar, e dos princípios por trás dela, é em grande parte conhecimento irrelevante, como é o processo de fabricar cartas de baralho para o (honesto) jogador de pôquer. As máquinas de fax são projetadas para uso por pessoas que não têm idéia de como a máquina em Londres reproduz um texto que foi posto nela em Los Angeles. Não funcionam melhor quando operadas por professores de eletrônica.

Assim a ciência, através do tecido saturado de tecnologia da vida humana, demonstra diariamente seus milagres ao mundo de fins do século XX. É tão indispensável e onipresente — pois mesmo os mais remotos confins da humanidade conhecem o rádio transistorizado e a calculadora eletrônica — quanto Alá para o muçulmano crente. É discutível quando essa capacidade de certas atividades humanas produzirem resultados sobre-humanos se tornou parte da consciência comum, pelo menos nas partes urbanas das sociedades industriais “desenvolvidas”. Certamente foi após a explosão da primeira bomba nuclear, em 1945. Contudo, não pode haver dúvida de que o século XX foi aquele em que a ciência transformou tanto o mundo quanto o nosso conhecimento dele.

Devíamos esperar que as ideologias do século XX se regozijassem com os triunfos da ciência, que são os triunfos da mente humana, como fizeram as ideologias seculares do século XIX. Na verdade, devíamos ter esperado até mesmo que enfraquecesse a oposição das ideologias religiosas tradicionais, grandes redutos de resistência à ciência do século XIX. Pois ela não apenas afrouxou o domínio das religiões tradicionais na maior parte do século, como

veremos, mas a própria religião se tornou tão dependente da ciência da tecnologia baseada na alta ciência quanto qualquer outra atividade humana no mundo desenvolvido. Se necessário, um bispo, imã ou homem santo na década de 1900 podia realizar suas atividades como se Galileu, Newton, Faraday ou Lavoisier jamais houvessem existido, ou seja, com base em tecnologia do século XV, e a tecnologia do século XIX não criou problemas de compatibilidade com a teologia ou textos sacros. Tornou-se muito mais difícil ignorar o conflito entre ciência e escritura sagrada numa era em que o Vaticano se viu obrigado a comunicar-se por satélite e testar a autenticidade do sudário de Turim por datação de rádio-carbono; em que o aiatolá Khomeini difundiu suas palavras do exterior para o Irã por meio de fitas cassete; e em que Estados dedicados às leis do Corão também se empenhavam em equipar-se com armas nucleares. A aceitação *de facto* da ciência contemporânea mais sofisticada, *via* a tecnologia que dela dependia, era tal que na Nova York de *fin-de-siècle* as vendas de produtos eletrônicos *super-high-tech* se tornaram em grande parte especialidade dos hassidim, um ramo de judaísmo messiânico oriental conhecido, além de seu extremo ritualismo e insistência em usar uma versão século XVIII de trajes poloneses, por preferir a emoção extática à investigação intelectual. Sob certos aspectos, a superioridade da “ciência” era até mesmo oficialmente aceita. Os protestantes fundamentalistas nos EUA, que rejeitavam a teoria da evolução como não evangélica (tendo o mundo sido criado em sua atual versão em seis dias), exigiram que a doutrina de Darwin fosse substituída, ou pelo menos contrabalançada, pela doutrina que eles chamavam de “ciência da criação”.

E no entanto, o século XX não se sentia à vontade com a ciência que fora a sua mais extraordinária realização, e da qual dependia. O progresso das ciências naturais se deu contra um fulgor, ao fundo, de desconfiância e medo, de vez em quando explodindo em chamas de ódio e rejeição da razão e de todos os seus produtos. E no espaço indefinido entre ciência e anticiência, entre os que buscavam a verdade última pelo absurdo e os profetas de um mundo composto exclusivamente de ficções, encontramos cada vez mais esse produto típico e em grande parte americano do século, sobretudo de sua segunda metade, a ficção científica. O gênero, antecipado por Júlio Verne (1828-1905), foi iniciado por H. G. Wells (1866-1946) no finzinho mesmo do século XIX. Embora suas formas mais juvenis, como os conhecidos *westerns* espaciais da TV e da tela grande, com cápsulas cósmicas em lugar de cavalos e raios da morte em lugar dos trabucos de seis balas, continuassem a velha tradição de aventuras fantásticas com engenhocas *high-tech*, na segunda metade do século as contribições mais sérias ao gênero se inclinaram para uma visão mais sombria ou pelo menos ambígua da condição humana e suas perspectivas.

A desconfiância e o medo da ciência eram alimentados por quatro sentimentos: o de que a ciência era incompreensível; o de que suas consequências

tanto práticas quanto morais eram imprevisíveis e provavelmente catastróficas; o de que ela acentuava o desamparo do indivíduo, e solapava a autoridade. Tampouco devemos ignorar o sentimento de que, na medida em que a ciência interferia na ordem natural das coisas, era inerentemente perigosa. Os primeiros dois sentimentos eram partilhados tanto por cientistas quanto leigos, os dois últimos pertenciam basicamente aos de fora. Os leigos só podiam reagir contra seu senso de impotência buscando coisas que “a ciência não pode explicar”, na linha do hamletiano “Há mais coisas entre o céu e a terra... do que sonha a tua vã filosofia”, recusando-se a acreditar que elas pudessem algum dia ser explicadas pela “ciência oficial”, e ansiando por acreditar no inexplicável *porque* parecia absurdo. Pelo menos num mundo desconhecido e incognoscível todos estariam igualmente impotentes. Quanto maiores os triunfos palpáveis da ciência, maior a fome de buscar o inexplicável. Pouco depois da Segunda Guerra Mundial, que culminou na bomba atômica, os americanos (1947), acompanhados depois por seus seguidores culturais, os britânicos, passaram a ver a chegada em massa de “objetos voadores não identificados”, claramente inspirados pela ficção científica. Acreditavam com toda a firmeza que eles vinham de civilizações extraterrestres diferentes e superiores à nossa. Os observadores mais entusiásticos chegaram a ver de fato seus cidadãos, de formas estranhas, saindo desses “discos voadores”, e um ou dois até mesmo disseram ter pegado carona com eles. O fenômeno tornou-se mundial, embora um mapa da distribuição das aterrissagens desses extraterrestres mostrasse uma séria preferência pelo pouso ou sobrevôo em territórios anglo-saxônicos. Qualquer ceticismo em relação aos ovnis era atribuído ao ciúme de cientistas de mentalidade tacanha, incapazes de explicar fenômenos além de seus estreitos horizontes, talvez até mesmo a uma conspiração dos que mantinham o homem comum em servidão intelectual para ocultar-lhe um saber superior.

Não se tratava das crenças em magia e milagres das sociedades tradicionais, para as quais essas intervenções na realidade faziam parte de vidas muito incompletamente controláveis, e muito menos espantosas do que, digamos, a visão de um avião ou a experiência de falar a um telefone. Tampouco eram parte do fascínio permanente e universal dos seres humanos com o monstro, o aberrante e o maravilhoso, de que a literatura popular dá testemunho desde a invenção da imprensa. Eram uma rejeição das afirmações e do domínio da ciência, às vezes de maneira consciente, como na extraordinária rebelião (mais uma vez centrada nos EUA) de grupos periféricos contra a prática de pôr flúor no abastecimento de água, depois de descobrir-se que a absorção desse elemento reduziria de forma impressionante a deterioração dental em populações urbanas modernas. Isso enfrentou uma resistência apaixonada não apenas em nome da liberdade de preferir cáries, mas (em seus oponentes mais extremados) como uma trama vil para enfraquecer os seres humanos pelo envenenamento compulsório. E nessa reação, vividamente retratada no filme

Doutor Fantástico (1963), de Stanley Kubrik, a desconfiança da ciência como tal se fundiu com o medo de suas consequências práticas.

Esse medo também foi espalhado pela inata hipocondria da cultura americana, à medida que a vida era cada vez mais submersa pela tecnologia moderna, incluindo a tecnologia médica, com seus riscos. O extraordinário gosto dos EUA por deixar que o litígio responda a todas as questões na disputa humana permite-nos acompanhar esses medos (Huber, 1990, pp. 97-118). Os espermicidas causavam efeitos colaterais? As linhas de transmissão de energia elétrica faziam mal a pessoas que moravam perto delas? O fosso entre os especialistas, que tinham algum critério para julgar, e os leigos, que só tinham esperança ou medo, foi alargado pela diferença entre a avaliação apaixonada, que bem poderia achar um pequeno grau de risco um preço a pagar por um grande grau de benefício, e indivíduos que, compreensivelmente, desejavam risco zero (pelo menos em teoria).*

Na verdade, esses eram os medos da desconhecida ameaça da ciência de homens e mulheres que só sabiam que viviam sob o domínio dela; temores cuja intensidade e foco diferiam segundo a natureza das suas opiniões, e temores sobre a sociedade contemporânea (Fischhof et al., 1978, pp. 127-52).*

Contudo, na primeira metade do século, os grandes riscos da ciência vinham não dos que se sentiam humilhados pelos ilimitados e incontroláveis poderes dela, mas dos que achavam que podiam controlá-los. Os únicos dois tipos de regime político (além das então raras reversões ao fundamentalismo religioso) que interferiam na pesquisa científica *em princípio* estavam ambos profundamente comprometidos com o progresso técnico sem limite e, em um caso, com uma ideologia que o identificava com a “ciência” e saudava a conquista do mundo pela razão e a experimentação. Contudo, de maneiras diferentes, tanto o stalinismo quanto o nacional-socialismo alemão rejeitavam a ciência mesmo quando a usavam para fins tecnológicos. O que contestavam era seu desafio a visões de mundo e valores expressos em verdades *a priori*.

Assim, nenhum dos dois regimes se sentiu à vontade com a física pós-Einstein. Os nazistas rejeitaram-na como “judia”, e os ideólogos soviéticos,

(*) A diferença entre teoria e prática nessa área é enorme, pois pessoas que estão dispostas a correr riscos bastante significativos na prática (por exemplo, num carro, em uma estrada, ou no metrô de Nova York) podem insistir em evitar a aspirina com base em que ela tem efeitos colaterais em casos um tanto raros.

(**) Os participantes classificaram os riscos e vantagens de tecnologias do século XX: geladeiras, fotocopiadoras, anticoncepcionais, pontes suspensas, energia nuclear, jogos eletrônicos, diagnósticos por raios X, armas nucleares, computadores, vacinas, fluorização da água, coletor solar no telhado, *lasers*, tranquilizantes, fotos Polaroid, energia elétrica fóssil, veículos motorizados, efeitos especiais no cinema, pesticidas, opiáceos, conservantes de alimentos, cirurgia de peito aberto, aviação comercial, engenharia genética e moinhos de vento (também Wildavsky, 1990, pp. 41-60).

como insuficientemente “materialista” no sentido leninista da palavra, embora ambos a tolerassem na prática, pois os Estados modernos não podiam passar sem os físicos, que eram pós-einsteinianos até o fim. Os nacional-socialistas, porém, se privaram da flor do talento europeu continental na física, expulsando judeus e adversários ideológicos para o exílio, e incidentalmente destruindo a supremacia científica alemã de princípios do século ao fazer isso. Entre 1900 e 1933, 25 dos 66 Prêmios Nobel de física e química tinham ido para a Alemanha, mas depois de 1933 só cerca de um em dez. Nenhum dos dois regimes se achava tampouco afinado com as ciências biológicas. As políticas raciais da Alemanha nazista horrorizavam os geneticistas sérios, que — em grande parte devido ao entusiasmo dos racistas pela eugenia — haviam começado no princípio do século a pôr uma certa distância entre si e as políticas de seleção e reprodução genéticas humanas (que incluíam matar os “incapazes”), embora se deva admitir, com tristeza, que houve bastante apoio ao racismo nacional-socialista entre biólogos e médicos alemães (Proctor, 1988). O regime soviético, sob Stalin, viu-se em choque com a genética tanto por motivos ideológicos quanto porque a política do Estado estava comprometida com o princípio de que, com suficiente esforço, *qualquer* mudança era realizável, enquanto a ciência indicava que, no campo da evolução em geral e da agricultura em particular, não era assim. Em outras circunstâncias, a controvérsia dos biólogos evolucionistas entre os seguidores de Darwin (para os quais a herança era genética) e os de Lamarck (que acreditavam na herança de características adquiridas e praticadas durante a vida do indivíduo) teria sido deixada para ser acertada em seminários e laboratórios. Na verdade, era encarada pela maioria dos cientistas como já acertada em favor de Darwin, quando nada por já mais ter-se descoberto qualquer indicio satisfatório de herança de características adquiridas. Sob Stalin, um biólogo de periferia, Trofim Denisovich Lisenko (1898-1976), conquistou o apoio de autoridades políticas com o argumento de que se podia multiplicar a produção agrícola com processos lamarckianos que abreviavam os lentos processos ortodoxos de reprodução de plantas e animais. Naquele tempo não era sensato discordar da autoridade. O acadêmico Nicolai Ivanovich Vavilov (1885-1943), o mais famoso dos geneticistas soviéticos, morreu num campo de trabalho por discordar de Lisenko (uma opinião partilhada pelo resto dos geneticistas soviéticos sérios), embora só depois da Segunda Guerra Mundial a biologia soviética se comprometesse oficialmente com a rejeição obrigatória da genética como entendida no resto do mundo, pelo menos até depois da morte do ditador. O efeito dessas políticas na ciência soviética foi, como seria de prever, desastroso.

Regimes do tipo nacional-socialista e soviético, apesar de absolutamente diferentes em muitos aspectos, partilhavam a crença em que seus cidadãos deviam aceitar uma “doutrina verdadeira”, mas formulada e imposta pelas autoridades político-ideológicas seculares. Daí a ambiguidade e o mal-estar em

relação à ciência, sentidos em tantas sociedades, encontrar expressão *oficial* em tais Estados, ao contrário de regimes políticos agnósticos em relação às crenças individuais de seus cidadãos, como os governos seculares haviam aprendido a ser durante o longo século XIX. Na verdade, o surgimento de regimes de ortodoxia secular foi, como vimos (ver capítulos 4 e 13), um subproduto da Era das Catástrofes, e não duraram. De qualquer modo, a tentativa de forçar a ciência a entrar em camisas-de-força ideológicas foi visivelmente contraproduitiva, onde se fez a sério (como na biologia soviética), ou ridicula, onde se deixou a ciência seguir seu próprio caminho enquanto a superioridade da ideologia era simplesmente afirmada (como na física alemã e soviética).* A imposição oficial de critérios para a validade da teoria científica no fim do século XX foi mais uma vez deixada a regimes baseados no fundamentalismo religioso. Apesar disso, persistiu o desconforto, inclusive porque a própria ciência se tornou cada vez mais inacreditável e incerta. Mas até a segunda metade do século esse desconforto não se devia ao temor dos resultados práticos da ciência.

É verdade que os próprios cientistas sabiam melhor que ninguém quais poderiam ser as consequências potenciais de suas descobertas. Desde a época em que a primeira bomba atômica se tornou operacional (1945), alguns deles advertiram seus senhores no governo sobre as forças destrutivas de que o mundo agora dispunha. Mas a idéia de que ciência é igual a catástrofe potencial pertenceu essencialmente à segunda metade do século: em sua primeira fase — o pesadelo da guerra nuclear —, até a era de superconfronto depois de 1945; em sua fase posterior e mais universal, até a era de crise que começou na década de 1970. Contudo, a Era das Catástrofes, talvez por ter diminuído, ainda de modo impressionante, o ritmo do crescimento econômico mundial, ainda foi de complacência científica sobre a capacidade humana de controlar os poderes da natureza, ou, na pior das hipóteses, sobre a capacidade da natureza de adaptar-se ao pior que o homem pudesse fazer.** Por outro lado, o que deixava os próprios cientistas inquietos então era sua nova incerteza sobre o que fazer com suas teorias e descobertas.

II

Em determinado período na Era dos Impérios partiram-se os laços entre as descobertas dos cientistas e a realidade baseada na experiência dos sentidos ou por eles imaginável; e o mesmo se deu com os laços entre a ciência e o tipo

(*) Assim, na Alemanha nazista permitiu-se que Werner Heisenberg ensinasse a relatividade, mas com a condição de que o nome de Einstein não fosse citado (Peierls, 1992, p. 44).

(**) “Pode-se dormir em paz com a consciência de que o Criador pôs alguns elementos à prova de erro na obra de suas mãos, e de que o homem é impotente para causar qualquer dano titânico”, escreveu Robert Millikan, de Caltech (Prêmio Nobel, 1923), em 1930.

de lógica baseado no senso comum ou por ele imaginado. Os dois rompimentos reforçaram-se um ao outro, pois o progresso das ciências naturais passou a depender cada vez mais de pessoas escrevendo equações (ou seja, sentenças matemáticas) em pranchetas de papel do que fazendo experiências em laboratório. O século XX seria o século dos teóricos dizendo aos práticos o que deviam buscar e encontrar à luz de suas teorias; em outras palavras, o século dos matemáticos. A biologia molecular, na qual, me informa uma boa autoridade, ainda há muito pouca teoria, é uma exceção. Não que a observação e a experimentação fossem secundárias. Ao contrário, sua tecnologia foi mais profundamente revolucionada que em qualquer época desde o século XVII pelos novos aparelhos e as novas técnicas, vários dos quais iriam receber a consagração científica última dos Prêmios Nobel.* Para citar apenas um exemplo, as limitações da ampliação simplesmente óptica foram superadas pelo microscópio eletrônico (1937) e pelo radiotelescópio (1957), com o resultado de que se tornou possível uma penetração muito mais profunda no reino molecular e mesmo atômico e nas distâncias do universo. Nas décadas recentes, a automação da rotina, e formas cada vez mais complexas de atividade e cálculo de laboratório, como as por computadores, elevaram mais e enormemente os poderes dos experimentadores, observadores, e cada vez mais dos teóricos construtores de modelos. Em alguns campos, notadamente na astronomia, isso levou a fazerem-se descobertas, às vezes por acaso, que posteriormente levaram à inovação teórica. A moderna cosmologia é no fundo o resultado de duas dessas descobertas: a observação, por Hubble, de que o universo deve estar em expansão, com base nas análises dos espectros das galáxias (1929); e a descoberta por Penzias e Wilson da radiação de origem cósmica (ruído de rádio) em 1965. Apesar disso, embora a ciência seja e deva ser uma colaboração entre cientistas e práticos, no Breve Século XX eram os teóricos que estavam na direção.

Para os próprios cientistas, o rompimento com a experiência dos sentidos e o senso comum significou um rompimento com as certezas tradicionais de seu campo e a metodologia deste. As consequências disso podem ser mais bem vividamente ilustradas seguindo-se a rainha das ciências na primeira metade do século, a física. De fato, na medida em que essa disciplina ainda é a que trata dos menores elementos da matéria, viva ou morta, e com a constituição e estrutura do maior conjunto de matéria, o universo, a física continuava sendo o pilar central das ciências naturais mesmo no fim do século, embora na segunda metade sofresse crescente competição das ciências vitais, transformadas após a década de 1950 pela revolução na biologia molecular.

Nenhum campo das ciências parecia mais firme, coerente e metodologicamente certo que a física newtoniana, cujas bases foram solapadas pelas teorias

(*) Bem mais de vinte Prêmios Nobel de física e química desde a Primeira Guerra Mundial foram concedidos em todo ou em parte a novos métodos de pesquisa, aparelhos e técnicas.

de Planck e Einstein e pela transformação da teoria atômica que se seguiu à descoberta da radiatividade na década de 1890. Era objetiva, ou seja, podia se submeter a observação adequada, sujeita a limitações técnicas na aparelhagem de observação (por exemplo, o microscópio ou telescópio ópticos). Não era ambígua: um objeto ou fenômeno era uma coisa ou outra, e a distinção entre elas era clara. Suas leis eram universais, igualmente válidas no nível cósmico e microcósmico. Os mecanismos que ligavam os fenômenos eram compreensíveis (isto é, capazes de ser expressos como “causa e efeito”). Por conseguinte, todo o sistema era em princípio determinista, e o objetivo da experiência em laboratório era demonstrar essa determinação eliminando, na medida do possível, a complexa confusão de vida comum que a ocultava. Só um tolo ou uma criança iria dizer que o vôo dos pássaros e borboletas negava as leis da gravidade. Os cientistas sabiam muito bem que havia declarações de princípios “não científicas”, mas estas não eram de seu interesse como cientistas.

Todas essas características foram questionadas entre 1895 e 1914. Era a luz um contínuo movimento de onda ou uma emissão de discretas partículas (fótons), como queria Einstein, seguindo Planck? Às vezes era melhor tratá-la como uma coisa, outras vezes, como outra; mas como elas se relacionavam, no caso de se relacionarem? Que era “de fato” a luz? Como declarou o próprio grande Einstein, vinte anos depois de criado o enigma: “Hoje temos duas teorias da luz, ambas indispensáveis, mas, deve-se admitir, sem qualquer relação lógica entre si, apesar de vinte anos de colossal esforço dos físicos teóricos” (Holton, 1970, p. 1017). Que se passava dentro do átomo, que era agora visto não como (segundo indicava seu nome grego) a menor unidade possível, e portanto indivisível, da matéria, mas como um complexo sistema que consistia de uma variedade de partículas ainda mais elementares? A primeira suposição, após a grande descoberta do núcleo atômico por Rutherford em 1911, em Manchester — um triunfo da imaginação experimental e a base da moderna física nuclear e do que acabou sendo chamado de “grande ciência” —, foi que os elétrons circulavam em órbitas em torno de seu núcleo, à maneira de um sistema solar miniaturizado. Contudo, quando se investigou a estrutura de átomos individuais, notadamente o de hidrogênio em 1912-3 por Niels Bohr, que sabia dos “quanta” de Max Planck, os resultados mostraram, mais uma vez, um profundo conflito entre o que os seus elétrons faziam e — palavras suas — “o grupo admiravelmente coerente de concepções que foi corretamente chamado de teoria clássica da eletrodinâmica” (Holton, 1970, p. 1028). O modelo de Bohr funcionou, isto é, tinha força explanatória brilhante e força previsiva, mas era “inteiramente absurdo e irracional” do ponto de vista da mecânica newtoniana clássica, e de qualquer forma desautorizava qualquer idéia do que de fato acontecia dentro do átomo quando o elétron “saltava” ou de outro modo passava de uma órbita para outra, ou do que acontecia entre o momento em que era descoberto em uma e quando aparecia em outra.

Que acontecia, de fato, às certezas da própria ciência, quando se tornava claro que o próprio processo de observar fenômenos no nível subatômico na verdade os modificava. Por esse motivo, quanto mais precisamente queremos conhecer a posição de uma partícula subatômica, mais incerta deve ser a velocidade dela. Já se disse de qualquer meio de observação detalhada para descobrir onde está "realmente" um elétron: "Olhá-lo é derrubá-lo" (Weisskopf, 1980, p. 37). Esse foi o paradoxo que um brilhante jovem físico alemão, Werner Heisenberg, generalizou em 1927 no famoso "princípio da incerteza" que traz o seu nome. O fato mesmo de que o nome se concentra em *incerteza* é significativo, pois indica o que preocupava os exploradores do novo universo científico quando deixavam para trás as certezas do velho. Não que eles próprios estivessem incertos ou produzissem resultados duvidosos. Ao contrário, suas previsões teóricas, por mais implausíveis e bizarras que fossem, eram constatações pela monótona observação e experiência, desde a época em que a teoria da relatividade geral de Einstein apareceu (1915) e foi constatada em 1919 por uma expedição britânica de observação de um eclipse, que descobriu que a luz de algumas estrelas distantes era desviada em direção ao sol, como previa a teoria. Para fins práticos, a física das partículas era tão sujeita à regularidade e tão previsível quanto a física newtoniana, embora de uma maneira diferente; e de qualquer modo, no nível supra-atômico, Newton e Galileu continuavam completamente válidos. O que deixava os cientistas nervosos era que não sabiam como juntar o velho e o novo.

Entre 1924 e 1927, as dualidades que tanto perturbavam os físicos no meio quartel do século foram eliminadas, ou antes postas de lado, por um brilhante golpe da física matemática, a construção da "mecânica quântica", imaginada quase simultaneamente em vários países. A verdadeira "realidade" dentro do átomo não era onda nem partícula, mas indivisíveis "estados quânticos" que se manifestavam potencialmente como qualquer uma das duas, ou como ambas. Era inútil encará-la como um movimento contínuo ou descontínuo, porque não podemos, nem agora nem nunca, seguir passo a passo o caminho do elétron. Conceitos da física clássica como posição, velocidade ou impulso não se aplicam além de determinados pontos, assinalados pelo "princípio da incerteza" de Heisenberg. Mas, claro, para além desses pontos aplicam-se outros conceitos, que produzem resultados que estão longe de ser incertos. Estes surgem dos padrões específicos produzidos pelas "ondas" ou "vibrações" de elétrons (de carga negativa), mantidos, dentro do espaço confinado do átomo, perto do núcleo (positivo). Sucessivos "estados quânticos" dentro desse espaço confinado produzem padrões bem definidos de frequências diferentes, que, como mostrou Schrödinger em 1926, podem ser calculados, como também a energia correspondente a cada um deles ("mecânica de onda"). Esses padrões de elétrons tinham um poder preditivo e explanatório bastante notável. Assim, muitos anos depois, quando se produziu plutônio pela primeira vez em reações

nucleares, em Los Alamos, a caminho da preparação da primeira bomba atômica, as quantidades eram tão pequenas que suas propriedades não puderam ser observadas. Contudo, pelo número de elétrons no átomo desse elemento, e pelos padrões desses 94 elétrons vibrando em torno do núcleo, e *por nada mais*, os cientistas previram (corretamente) que o plutônio se revelaria um metal marrom, com uma massa específica de cerca de vinte gramas por centímetro cúbico, e possuiria certa condutividade e elasticidade elétricas e térmicas. A mecânica quântica também explicava por que os átomos (e as moléculas e combinações mais elevadas neles baseadas) permaneciam estáveis, ou antes, que seria necessária uma introdução de energia extra para mudá-los. Na verdade, foi dito que

mesmo os fenômenos da vida — a forma do DNA e o fato de que diferentes nucleotídeos são resistentes ao movimento termal à temperatura ambiente — se baseiam nesses padrões primais. O fato de que em toda primavera surgem as mesmas flores se baseia na estabilidade dos padrões dos diferentes nucleotídeos. (Weisskopf, 1980, pp. 35-8)

Contudo, esse grande e espantosamente frutífero avanço na exploração da natureza foi conseguido sobre as ruínas do que se considerava certo e adequado na teoria científica, e por uma voluntária suspensão da descrença, que não só os cientistas mais velhos acharam problemática. Veja-se a "antimatéria", que Paul Dirac propôs em Cambridge, depois de ter descoberto (1928) que suas equações tinham soluções correspondentes a estados de elétrons com uma energia *menor* que a energia zero do espaço vazio. O conceito de "antimatéria", sem sentido em termos do dia-a-dia, tem sido manipulado com sorte por físicos desde então (Weinberg, 1977, pp. 23-4). A simples palavra implicava uma recusa deliberada a deixar que o progresso do cálculo teórico fosse desviado por qualquer idéia preconcebida da realidade: qualquer que se revelasse ser a realidade, ela chegaria às equações. E, no entanto, não era fácil aceitar isso, mesmo para cientistas que há muito tinham deixado para trás a opinião do grande Rutherford de que nenhuma física podia ser boa se não pudesse ser explicada a uma garçonne de bar.

Houve pioneiros da nova ciência que simplesmente acharam impossível aceitar o fim das velhas certezas, assim como seus fundadores, Max Planck e o próprio Albert Einstein, que manifestou desconfiança de leis puramente probabilísticas, em vez da causalidade determinista, numa frase bastante conhecida: "Deus não joga dados". Não tinha argumentos válidos, mas "uma voz íntima me diz que a mecânica quântica não é a verdade de fato" (citado em M. Jammer, 1966, p. 358). Mais de um dos próprios revolucionários do quantum sonharam eliminar as contradições subordinando um lado a outro: Schrödinger esperava que sua "mecânica de onda" houvesse dissolvido os supostos "saltos" de elétrons de uma órbita atômica para outra, no processo *contínuo* de

troca de energia, e, ao fazer isso, houvesse preservado espaço, tempo e causalidade clássicos. Revolucionários pioneiros relutantes, notadamente Planck e Einstein, suspiraram de alívio, mas em vão. O jogo era novo. As velhas regras não mais se aplicavam.

Podiam os físicos aprender a viver com a permanente contradição? Niels Bohr achava que podiam e deviam. Não havia como expressar a totalidade da matéria numa descrição única, em vista da natureza da linguagem humana. Não podia haver modelo único, diretamente abrangente. A única maneira de avaliar a realidade era comunicando-a de modos diferentes e juntando todos os modelos para complementarem-se uns aos outros numa “exaustiva sobreposição de diferentes descrições que incorporam idéias aparentemente contraditórias” (Holton, 1970, p. 1018). Era o princípio da “complementaridade” de Bohr, um conceito metafísico semelhante à relatividade, que ele extraía de autores muito distantes da física, e encarava como tendo aplicabilidade universal. A “complementaridade” de Bohr não se destinava a avançar a pesquisa dos cientistas atômicos, mas antes a consolá-los justificando suas confusões. O seu apelo dela está fora do campo da razão. Pois embora todos nós, e não menos os cientistas inteligentes, saibamos que existem diferentes modos de perceber a mesma realidade, às vezes não comparáveis ou mesmo contraditórios, mas que todos precisamos apreendê-la em sua totalidade, ainda não temos idéia de como os relacionamos. O efeito de uma sonata de Beethoven pode ser analisado física, fisiológica e psicologicamente, e também pode ser absorvido ouvindo-se-a; mas como se relacionam esses modos de compreensão? Ninguém sabe.

Apesar disso, continuou a intranquilidade. De um lado, havia a síntese da nova física de meados da década de 1920, que oferecia uma maneira extraordinariamente eficaz de forçar os cofres fortes da natureza. Os conceitos básicos da revolução do quantum ainda eram aplicados em fins do século xx. A menos que todos sigamos os que vêem a análise não nuclear, tornada possível pela computação, como um começo radicalmente novo, não houve revolução na física desde 1900-27, mas apenas enormes avanços evolucionários dentro do mesmo quadro conceitual. Por outro lado, houve generalizada incoerência. Em 1931, essa incoerência se estendeu até o último reduto da certeza, a matemática. Um lógico matemático austríaco, Kurt Gödel, provou que um sistema de axiomas jamais pode se basear em si mesmo. Se se quer demonstrá-lo como consistente, é preciso empregar princípios de fora do sistema. À luz do “teorema de Gödel”, não se poderia sequer pensar num mundo consistente internamente não contraditório.

Essa foi a “crise da física”, para citar o título de um livro de um jovem intelectual autodidata marxista britânico que foi morto na Espanha, Christopher Caudwell (1907-37). Não se tratava apenas de uma “crise das fundações”, como foi chamado o período 1900-30 na matemática (ver *A era dos impérios*, capítulo 10), mas também da imagem geral do mundo dos cientistas.

Na verdade, enquanto os físicos aprendiam a dar de ombros a questões filosóficas, enquanto mergulhavam no novo território que se abria à sua frente, o segundo aspecto da crise se tornava ainda mais importuno. Pois nas décadas de 1930 e 1940 a estrutura do átomo foi se tornando cada vez mais complicada de ano para ano. Desaparecera a simples dualidade de núcleo positivo e elétron(s) negativo(s). Os átomos eram agora habitados por uma fauna e flora crescentes de partículas elementares, algumas de fato muito estranhas. Chadwick, de Cambridge, descobriu a primeira dessas em 1932, os nêutrons eletricamente neutros — embora outros, como o neutrino sem massa e eletricamente neutro, já houvessem sido previstos em bases teóricas. Essas partículas subatômicas, quase todas de vida breve e passageiras, multiplicavam-se, sobretudo sob o bombardeio dos aceleradores de alta energia da “grande ciência”, que se tornaram disponíveis depois da Segunda Guerra Mundial. No fim da década de 1950, havia mais de cem delas, e não se via o fim. O quadro se complicou ainda mais, a partir de inícios da década de 1930, com a descoberta de duas forças desconhecidas e obscuras atuando dentro do átomo, além das elétricas que ligavam núcleo e elétrons. A chamada “força forte” ligava o nêutron e o próton de carga positiva no núcleo atômico, e a chamada “força fraca” era responsável por certos tipos de decomposição de partículas.

Ora, no entulho conceitual sobre o qual se ergueram as ciências do século xx, uma suposição básica e essencialmente estética não foi contestada. Na verdade, enquanto à incerteza obscurecia todas as outras, ela se tornou cada vez mais fundamental para os cientistas. Como o poeta Keats, eles acreditavam que “Beleza é verdade, verdade é beleza”, embora o critério de beleza deles não fosse o dele. Uma bela teoria, que era em si uma presunção de verdade, devia ser elegante, econômica e geral. Devia unir e simplificar, como tinham feito até então os grandes triunfos da teoria científica. A revolução científica da época de Galileu e Newton mostrara que as mesmas leis governam céus e terra. A revolução química reduzira a interminável variedade de formas em que a matéria aparecia a 92 elementos sistematicamente relacionados. O triunfo da física do século fora mostrar que eletricidade, magnetismo e fenômenos ópticos tinham as mesmas raízes. Contudo, a nova revolução na ciência produzira não simplificação, mas complicação. A maravilhosa teoria da relatividade de Einstein, que descrevia a gravidade como uma manifestação da curvatura do espaço-tempo, na verdade introduziu uma perturbadora dualidade na natureza: “de um lado estava o palco — o espaço-tempo curvo, a gravidade; de outro, os atores — os elétrons, os prótons, os campos eletromagnéticos — e não havia elo entre eles” (Weinberg, 1979, p. 43). Durante os últimos quarenta anos de sua vida, Einstein, o Newton do século xx, mourejou para produzir uma “teoria de campo unificada” que unisse eletromagnetismo e gravidade, mas não conseguiu — e agora havia mais duas classes de força, aparentemente não relacionadas na natureza, sem relações aparentes com o eletromagnetismo e a gra-

vidade. A multiplicação de partículas subatômicas, por mais emocionante que fosse, só podia ser uma verdade temporária, preliminar, porque, por mais linda que se mostrasse em detalhe, não havia beleza no novo átomo como antes havia no velho. Mesmo o pragmatista puro da era, para o qual o único critério de uma hipótese era que funcionasse, tinha, pelo menos, de sonhar às vezes com uma nobre, bela e geral "teoria de tudo" (para usar a expressão de um físico de Cambridge — Stephen Hawking). Mas ela parecia sumir na distância, embora da década de 1960 em diante os físicos começassem, mais uma vez, a divisar a possibilidade de uma tal síntese. Na verdade, na década de 1990 havia uma generalizada crença entre os físicos em que haviam quase chegado a um nível realmente básico, e que a multiplicidade de partículas elementares podia ser reduzida a um agrupamento relativamente simples e coerente.

Ao mesmo tempo, nas indefinidas fronteiras entre temas tão amplamente díspares como meteorologia, ecologia, física não nuclear, astronomia, dinâmica de fluidos e vários ramos da matemática independentemente iniciados na União Soviética e (ligeiramente depois) no Ocidente, e ajudados pelo extraordinário desenvolvimento dos computadores como instrumento analítico e inspiração visual, surgia — ou ressurgia — um novo ramo de síntese, sob o enganoso nome de "teoria do caos". Pois o que revelava não era tanto os imprevisíveis resultados de procedimentos científicos perfeitamente deterministas, mas a extraordinária universalidade de formas e padrões da natureza em suas manifestações mais díspares e aparentemente sem qualquer relação.* A teoria do caos ajudou a dar uma nova virada, por assim dizer, na velha causalidade. Quebrava os elos entre a causalidade e a previsibilidade, pois sua essência não era que os acontecimentos fossem fortuitos, mas que os efeitos que se seguiam a causas especificáveis não podiam ser previstos. Reforçava outro desenvolvimento, iniciado entre paleontólogos, e de considerável interesse para os historiadores, sugerindo que as cadeias de desenvolvimento histórico ou evolucionário são perfeitamente coerentes e capazes de explicação *após* o fato, mas que os resultados eventuais não podem ser previstos desde o início, porque, se se seguir novamente o mesmo curso, é só haver qualquer mudança inicial, por mais leve e sem aparente importância que seja na época, "e a evolução desemboca num canal radicalmente diferente" (Gould, 1989, p. 51). As consequências políticas, sociais e econômicas desse método podem ser de longo alcance.

(*) O desenvolvimento da "teoria do caos" nas décadas de 1970 e 1980 tem alguma coisa em comum com o surgimento no início do século XIX de uma escola "romântica" de ciência, centrada sobretudo na Alemanha (*Naturphilosophie*), em reação à corrente principal "clássica", centrada na França e Grã-Bretanha. É interessante que dois eminentes pioneiros da nova pesquisa (Feigenbaum, Libchaber — ver Gleick, 1988, pp. 163 e 197) foram de fato inspirados pela teoria das cores de Goethe, apaixonadamente antineutonian, e seu tratado sobre *A transformação das plantas*, que pode ser encarado como uma teoria evolucionária anti-Darwin em perspectiva (sobre *Naturphilosophie*, ver *A era das revoluções*, capítulo 15).

Além disso, havia o absurdo, puro e simples, que era grande parte do mundo dos novos físicos. Enquanto se limitava ao interior do átomo, não afetava diretamente a vida comum, que mesmo os cientistas vivem, mas pelo menos uma descoberta nova e não assimilada não podia ser posta de quarentena desse jeito. Era o fato extraordinário, previsto por alguns com base na teoria da relatividade, mas observado pelo astrônomo americano E. Hubble em 1929, de que todo o universo parecia estar-se expandindo num ritmo esteante. Essa expansão, que até mesmo muitos cientistas achavam difícil de engolir, alguns idealizando teorias alternativas de "estado firme" do cosmos, foi constatada por outros dados astronômicos na década de 1960. Era impossível não especular sobre aonde essa expansão o estaria levando (e a nós), quando e como começara, e portanto sobre a história do universo, a partir do "big-bang" inicial. Isso produziu o florescente campo da cosmologia, a parte da ciência do século XX mais prontamente transformada em *best-sellers*. Também aumentou enormemente o elemento de história nas ciências naturais, até então (a não ser pela geologia e seus subprodutos) orgulhosamente desinteressadas dela, e incidentalmente reduziu a identificação de ciência "pesada" com experiência, isto é, com a reprodução de fenômenos naturais. Pois como se podiam repetir acontecimentos irrepetíveis? O universo em expansão, assim, aumentou a confusão tanto de cientistas como de leigos.

Essa confusão confirmou os que viveram a Era das Catástrofes, e sabiam ou pensavam sobre tais questões, em sua convicção de que um velho mundo acabara, ou, no mínimo dos mínimos, se achava em convulsão terminal, mas ainda não se discerniam claramente os contornos do novo. O grande Max Planck não tinha dúvida sobre a relação entre a crise na ciência e na vida externa:

Estamos vivendo um momento bastante singular da história. É um momento de crise no sentido literal desta palavra. Em cada ramo de nossa civilização espiritual e material parecemos ter chegado a um ponto de virada crítico. Esse espírito se mostra não só no estado real dos assuntos públicos, mas também na atitude geral em relação a valores fundamentais na vida pessoal e social [...] Agora o icoclasta invadiu o templo da ciência. Difícilmente haverá um axioma científico que não seja hoje negado por alguém. E ao mesmo tempo praticamente qualquer teoria idiota quase certamente teria crentes e discípulos num lugar ou noutro. (Planck, 1933, p. 64)

Nada era mais natural que um alemão de classe média criado nas certezas do século XIX expressasse tais sentimentos nos dias da Grande Depressão e da ascensão de Hitler ao poder.

Apesar disso, tristeza era o oposto do que a maioria dos cientistas sentia. Eles concordavam com Rutherford, que disse à Associação Britânica (1923) que "estamos vivendo na idade heróica da física" (Howarth, 1978, p. 92). Todo número de publicações científicas, todo colóquio — pois a maioria dos cientistas adorava, mais que nunca, combinar cooperação e competição — trazia

novos, emocionantes e profundos avanços. A comunidade científica ainda era bastante pequena, pelo menos em temas pontas-de-lança como a física nuclear e a cristalografia, para oferecer a quase todo jovem pesquisador a perspectiva do estrelato. Ser cientista era ser invejado. Certamente, os que estudavam em Cambridge, que produziu a maioria dos trinta Prêmios Nobel britânicos da primeira metade do século — e que, para fins práticos, era a ciência britânica nessa época —, sabiam o que gostariam de estudar, se fossem suficientemente bons em matemática.

Na verdade, as ciências naturais não podiam esperar nada além de maiores triunfos e avanço intelectual, o que tornava tolerável o caráter remendado, as imperfeições e improvisações da teoria então corrente, pois tinham de ser apenas temporários. Por que iriam pessoas que ganhavam Prêmios Nobel por trabalhos feitos aos vinte e poucos anos deixar de confiar no futuro? E no entanto, como podiam mesmo os homens (e, ocasionalmente, as mulheres) que continuavam a provar a realidade da abalada idéia de “progresso” em seu campo de atividade humana permanecer imune à época de crise e catástrofe em que viviam?

Não podiam, e não permaneceram. A Era das Catástrofes foi portanto também uma das comparativamente poucas eras de cientistas politizados, e não só porque a migração em massa de cientistas racial e ideologicamente inaceitáveis de grandes zonas da Europa demonstrava que os cientistas não podiam ter certeza de sua imunidade pessoal. De qualquer modo, o cientista britânico típico da década de 1930 era membro do (esquerdista) Grupo Antiguerra dos Cientistas de Cambridge, confirmado em seu radicalismo pelas indistintas simpatias de seus membros mais estabelecidos, cuja proeminência ia da Royal Society ao Prêmio Nobel: Bernal (cristalografia), Haldane (genética), Needham (embriologia química), ** Blackett (física), Dirac (física) e o matemático G. H. Hardy, que considerava que só dois outros no século xx se achavam na classe de seu herói australiano do críquete, Don Bradman: Lenin e Einstein. O jovem cientista americano típico da década de 1930 mais que provavelmente se veria em apuros políticos nos anos de Guerra Fria do pós-guerra por simpatias radicais do pré-guerra ou sua continuação, como Robert Oppenheimer (1904-67), o principal arquiteto da bomba atômica, e o químico Linus Pauling (1901-), que ganhou dois Prêmios Nobel, incluindo um da paz, e um Prêmio Lenin. O cientista francês típico era simpatizante da Frente Popular da década de 1930 e ativo partidário da Resistência durante a guerra; não eram muitos os franceses que estavam entre estes últimos. O cientista refugiado típico da Europa Central dificilmente poderia não ser hostil ao fascismo, por mais desinteressado das questões públicas que fosse. Os cientis-

(*) A revolução na física de 1924-8 foi feita por homens nascidos em 1900-2 (Heisenberg, Pauli, Dirac, Fermi, Joliot), Schrödinger, De Broglie, e Max Born estavam na casa dos trinta.

(**) Mais tarde ele se tornou o eminente historiador de ciência na China.

tas que ficaram ou foram impedidos de partir dos países fascistas ou da URSS tampouco podiam evitar as políticas de seus governos, simpatizando com elas ou não, quando nada porque lhes impunham gestos públicos, como a saudação de Hitler na Alemanha, que o grande físico Max von Laue (1897-1960) evitava levando alguma coisa nas duas mãos sempre que saía de casa. Ao contrário das ciências sociais e humanas, essa politização era incomum nas ciências naturais, cujo tema não exige, nem sequer sugere, opiniões sobre assuntos humanos (a não ser em partes das ciências da vida) embora muitas vezes sugira opiniões sobre Deus.

Contudo, os cientistas eram mais diretamente politizados por sua crença em que os leigos, incluindo os políticos, não tinham idéia do extraordinário potencial que a ciência moderna, adequadamente usada, punha à disposição da sociedade humana. Tanto o colapso da economia mundial quanto a ascensão de Hitler pareciam confirmar isso de modos diferentes. (Por outro lado, a dedicação marxista oficial da União Soviética e de sua ideologia às ciências naturais levou muitos ocidentais nessa época a vê-la como um regime adequado para realisar esse potencial.) Tecnocracia e radicalismo convergiram, porque nesse ponto era a esquerda política, com seu compromisso ideológico com a ciência, racionalismo e progresso (ridicularizado pelos conservadores com o novo termo “cientificismo”),* que naturalmente representava o reconhecimento e apoio adequados à “Função social da ciência”, para citar o título de um influentíssimo livro e manifesto da época (Bernal, 1939), caracteristicamente escrito por um físico brilhante e militantemente marxista. Foi igualmente característico que o governo da Frente Popular francesa de 1936-9 estabelecesse o primeiro Subsecretariado de Pesquisa Científica (ocupado pela laureada com o Nobel Irène Joliot-Curie), e desenvolvesse o que ainda é o principal mecanismo para financiar a pesquisa francesa, o CNRS (*Centre Nationale de la Recherche Scientifique*). Na verdade, tornou-se cada vez mais óbvio, pelo menos para os cientistas, que era necessário não apenas financiamento público, mas uma pesquisa organizada publicamente. Os serviços científicos do governo britânico, que em 1930 empregavam um grandioso total de 743 cientistas, não podiam ser adequados — trinta anos depois, empregavam mais de 7 mil (Bernal, 1967, p. 931).

A era de ciência politizada atingiu o auge na Segunda Guerra Mundial, o primeiro conflito desde a era jacobina da Revolução Francesa em que cientistas se mobilizaram sistemática e *fundamentalmente* para fins militares; é provável que de modo mais efetivo do lado dos aliados do que do da Alemanha, Itália e Japão, porque jamais esperaram ganhar rapidamente com recursos e métodos disponíveis de imediato (ver capítulo 1). Tragicamente, a própria guerra nuclear foi a filha do antifascismo. Uma simples guerra entre Estados-

(*) A palavra aparece pela primeira vez em 1936 na França (Guerlac, 1951, pp. 93-4).

nações certamente não teria levado os físicos nucleares de ponta, eles próprios em grande parte refugiados ou exilados do fascismo, a exortar os governos britânico e americano a construir uma bomba nuclear. E o próprio horror desses cientistas com seu feito, suas desesperadas lutas de última hora para impedir os políticos e generais de usar de fato a bomba, dão testemunho da força das paixões *políticas*. Na verdade, até onde as campanhas antinucleares após a Segunda Guerra Mundial tiveram maciço apoio na comunidade científica, foi entre os membros das gerações antifascistas politizadas.

Ao mesmo tempo, a guerra finalmente convenceu os governos de que o empenho de recursos até então unimagináveis na pesquisa científica era tão praticável quanto, no futuro, essencial. Nenhuma economia, com exceção da americana, podia ter financiado os 2 bilhões de dólares (valores do tempo da guerra) necessários para construir a bomba atômica durante a guerra; mas também é verdade que governo algum teria, antes de 1940, sonhado em gastar mesmo uma pequena fração dessa quantia num projeto especulativo, baseado em alguns cálculos incompreensíveis de acadêmicos descabelados. Após a guerra, o céu, ou antes o tamanho da economia apenas, tornou-se o limite nos orçamentos e empregos científicos. Na década de 1970, o governo americano financiou dois terços dos custos da pesquisa básica naquele país, que então chegavam a 5 bilhões de dólares *por ano*, e empregava alguma coisa em torno de 1 milhão de cientistas e engenheiros (Holton, 1978, pp. 227-8).

III

A temperatura política da ciência caiu após a Segunda Guerra Mundial. O radicalismo nos laboratórios recuou rapidamente em 1947-9, quando opiniões tidas como sem base e bizarras em outras partes se tornaram obrigatórias para os cientistas na URSS. Mesmo a maioria dos até então leais comunistas achava o lisenkismo (ver p. 514) impossível de engolir. Além disso, tornou-se cada vez mais evidente que os regimes modelados com base no sistema soviético não eram nem material, nem moralmente atraentes, pelo menos para a maioria dos cientistas. Por outro lado, apesar de muita propaganda, a Guerra Fria entre o Ocidente e o bloco soviético jamais gerou nada parecido às paixões políticas antes despertadas pelo fascismo. Talvez isso se devesse à tradicional afinidade entre racionalismo liberal e marxista, ou talvez ao fato de que a URSS, ao contrário da Alemanha nazista, jamais pareceu em posição de conquistar o Ocidente, mesmo que houvesse querido, o que havia bom motivo para duvidar. Para a maioria dos cientistas ocidentais, a URSS, seus satélites e a China comunista eram mais Estados ruins, com cientistas dignos de pena, do que impérios do mal a exigir uma cruzada.

No Ocidente desenvolvido, as ciências naturais continuaram política e

ideologicamente quietas durante uma geração, desfrutando seus triunfos intelectuais e os recursos imensamente ampliados agora disponíveis para suas pesquisas. Na verdade, o generoso patrocínio de governos e grandes empresas estimulou uma raça de pesquisadores que tinham as políticas de seus pagadores como ponto pacífico, e preferiam não pensar nas implicações mais amplas de seus trabalhos, sobretudo quando estes eram militares. No máximo, os cientistas nesses setores protestavam por não poderem publicar os resultados de suas pesquisas. Na verdade, a maioria dos membros do que era agora um exército bastante grande de Ph.Ds, empregados na Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), estabelecida para enfrentar o desafio soviético em 1958, não tinha mais interesse direto em interrogar a justificação de suas atividades do que os membros de qualquer outro exército. Em fins da década de 1940, homens e mulheres ainda se angustiavam em torno da questão de entrar ou não em estabelecimentos do governo que se especializavam em pesquisa de guerra química e biológica.* Não há indício de que posteriormente tais estabelecimentos tivessem qualquer problema para recrutar suas equipes.

Um tanto inesperadamente, foi na região soviética do globo que a ciência se tornou, quando nada, mais política à medida que avançava a segunda metade do século. Não por acaso o maior porta-voz nacional (e internacional) da dissidência na URSS seria um cientista, Andrei Sakharov (1921-89), o físico que fora o principal responsável, em fins da década de 1940, pela construção da bomba de hidrogênio soviética. Os cientistas eram membros *par excellence* da nova, grande, educada e tecnicamente formada classe média profissional que iria ser a principal realização do sistema soviético, mas ao mesmo tempo a classe se mais diretamente consciente das fraquezas e limitações do sistema. Eram mais essenciais para o sistema do que suas contrapartes no Ocidente, pois somente eles possibilitavam a uma economia, fora isso atrasada, enfrentar os EUA como superpotência. Na verdade demonstraram sua indispensabilidade fazendo com que a URSS por algum tempo ultrapassasse o Ocidente na mais alta das tecnologias, a do espaço cósmico. O primeiro satélite artificial (o *Sputnik*, 1957), o primeiro voo espacial tripulado por homem e mulher (1961, 1963) e os primeiros passeios espaciais foram todos russos. Concentrados em institutos de pesquisa ou "cidades da ciência" especiais, articulados, necessariamente conciliados e com certo grau de liberdade concedido pelo regime pós-Stalin, não surpreende que as opiniões críticas fossem geradas no ambiente de pesquisa, cujo prestígio social era de qualquer modo maior que o de qualquer outra ocupação soviética.

(*) Lembro-me do desconforto, nessa época, de um (antes pacifista, depois comunista) amigo bioquímico que assumira um posto desses no relevante estabelecimento britânico.

Podem dizer-se que essas flutuações de temperatura política e ideológica afetaram o progresso das ciências naturais? Claramente muito menos do que ocorria nas ciências sociais e humanas, para não falar nas ideologias e filosofias. As ciências naturais podiam refletir o século em que os cientistas viviam apenas nos limites da metodologia empiricista que necessariamente se tornara padrão numa era de incerteza epistemológica: os da hipótese constável — ou, em termos de Karl Popper (1902-), que muitos cientistas faziam seus, falsificáveis — por testes práticos. Isso impunha limites à ideologização. A ecologia, embora sujeita às exigências de lógica e coerência, floresceu como uma forma de teologia — provavelmente, no mundo ocidental, como o ramo mais influente de teologia secular — porque pode ser, e em geral é, formulada de modo a não sofrer esse controle. A física não pode. Assim, enquanto é fácil demonstrar que as escolas em conflito e as modas em mudança no pensamento econômico refletem diretamente a experiência contemporânea e o debate ideológico, o mesmo não se dá com a cosmologia.

Contudo, a ciência reflete sua época, embora seja inegável que alguns movimentos importantes na ciência são endógenos. Assim, era quase inevitável que a desordenada multiplicação de partículas subatômicas, sobretudo depois de acelerar-se na década de 1950, levasse os teóricos a buscar simplificação. A natureza (inicialmente) arbitrária da nova e hipotética “partícula última”, da qual agora se dizia que prótons, elétrons, nêutrons e o resto se compunham, é indicada pelo próprio nome, tirado de *Finnegans wake*, de James Joyce: o *quark* (1963). Ele logo seria dividido em três ou quatro subespécies (com seus “antiquarks”), descritas como “de cima”, “de baixo”, “dos lados” ou “estranhos”, e quarks com “encanto”, cada um deles dotado de uma propriedade chamada “cor”. Nenhuma dessas palavras tinha nada parecido aos seus significados habituais. Como sempre, fizeram-se previsões bem-sucedidas com base nessa teoria, ocultando-se com isso o fato de que nenhum indicio experimental da existência de qualquer tipo de quark havia sido descoberto até a década de 1990.* Se esses novos fatos constituíam uma simplificação do labirinto subatômico ou mais uma camada de complexidade, deve-se deixar que físicos adequadamente qualificados o julguem. Contudo, o observador leigo cético, mesmo que admirador, pode às vezes ser lembrado dos titânicos esforços de inteligência e engenhosidade despendidos no fim do século XIX para manter a crença científica no “éter”, antes que a obra de Planck e Einstein o banisse para o museu de pseudoteorias, junto com o “flogisto” (ver *A era dos impérios*, capítulo 10).

(*) John Maddox comenta que depende do que se quer dizer por “descoberto”. Identificaram-se efeitos particulares dos quarks, mas, parece, eles não são descobertos “sós”, e sim em pares ou tripos. O que intriga os físicos não é se os quarks estão lá, mas por que nunca estão sós.

A própria falta de contato de tais construções teóricas com a realidade que pretendiam explicar (exceto como hipóteses falsificáveis) deixava-as abertas a influências do mundo exterior. Não seria uma coisa natural, num século tão dominado pela tecnologia, que as analogias mecânicas ajudassem a recitá-las, embora sob a forma de técnicas de comunicação e controle tanto em animais como em máquinas, técnicas essas que de 1940 em diante geraram um corpo teórico conhecido por vários nomes (cibernética, teoria de sistemas gerais, teoria da informação etc.)? Os computadores eletrônicos, que se desenvolveram com estonteante rapidez após a Segunda Guerra Mundial, sobretudo após a descoberta do transistor, tinham uma enorme capacidade de simulação, que tornava mais fácil que antes derivar modelos mecânicos daquilo que até então se encarava como operações físicas e mentais de organismos, incluindo os humanos. Cientistas de fins do século XX falavam do cérebro como se fosse um elaborado sistema de processamento de informação, e um dos conhecidos debates filosóficos da segunda metade do século era se, e neste caso como, a inteligência humana podia distinguir-se da “inteligência artificial”, ou seja, se algo na mente humana não era teoricamente programável num computador. Que tais modelos tecnológicos avançaram a pesquisa, não entra em questão. Onde estaria o estudo do sistema nervoso (isto é, o estudo dos impulsos nervosos elétricos) sem o da eletrônica? Contudo, no fundo essas são analogias reducionistas, que bem podem um dia parecer datadas, como a descrição, no século XVIII, do movimento humano em termos de um sistema de alavancas.

Tais analogias eram úteis na formulação de modelos particulares. Contudo, além desses, a experiência de vida dos cientistas não podia deixar de afetar sua maneira de ver a natureza. O nosso foi um século em que, para citar um cientista criticando outro, “o conflito entre os gradualistas e o catastrofismo impregna a experiência humana” (Jones, 1992, p. 12). E portanto, não surpreendentemente, passou a impregnar a ciência.

No século XIX, de melhoramento e progresso burgueses, a continuidade e o gradualismo dominaram os paradigmas da ciência. Fosse qual fosse o modo de locomoção da natureza, ela não podia saltar. A mudança geológica e a evolução da vida na terra prosseguiram sem catástrofes e com minúsculos aumentos. Mesmo o fim previsível do universo num futuro remoto seria gradual, pela insensível mas inevitável transformação de energia em calor, de acordo com a segunda lei da termodinâmica (a “morte por calor do universo”). A ciência do século XX desenvolveu uma imagem bem diferente do mundo.

Nosso universo nasceu, há 15 bilhões de anos, numa maciça superexplosão, e, segundo as especulações cosmológicas da época em que escrevo, pode acabar de maneira igualmente dramática. Dentro dele, o histórico de vida das estrelas, e portanto de seus planetas, está, como o universo, cheio de cataclismos: novas, supernovas, gigantes vermelhas, anãs brancas, buracos negros e o resto — nenhum deles reconhecido ou encarado como mais que fenômenos

astronômicos periféricos antes da década de 1920. A maioria dos geólogos resistiu durante muito tempo à idéia de grandes deslocamentos laterais, como os continentes movendo-se em todo o globo no curso da história da terra, embora a evidência disso fosse mais ou menos forte. E o fizeram com base em grande parte ideológica, a julgar pela extraordinária ira da controversia contra o principal proponente da "deriva continental", Alfred Wegener. De qualquer modo, o argumento de que isso não podia ser verdade porque não se conhecia nenhum mecanismo geofísico para causar tais movimentos não era mais convincente *a priori*, em vista da evidência, do que o argumento de lord Kelvin, no século XIX, de que a escala de tempo então postulada por geólogos devia estar errada, porque a física, como então entendida, fazia a terra muito mais jovem do que a geologia exigia. Contudo, desde a década de 1960 o antes impensável tornou-se a ortodoxia da geologia do dia-a-dia: um globo de placas gigantescas mudando de lugar, às vezes rapidamente ("placas tectônicas").

Talvez ainda mais a propósito seja o retorno do catastrofismo direto tanto à geologia quanto à teoria da evolução via paleontologia, desde a década de 1960. Mais uma vez, a evidência *prima facie* há muito é conhecida: toda criança sabe da extinção dos dinossauros no fim do período cretáceo. Tal fosse pela força da crença darwiniana em que a evolução *não* resultava de catástrofes (ou criação), mas de lentas e minúsculas mudanças atuando durante toda a história geológica, que esse aparente cataclismo ecológico chamou pouca atenção. O tempo geológico era simplesmente encarado como suficientemente longo para permitir quaisquer mudanças evolucionárias observadas. Surpreende, assim, que, numa era em que a história humana foi tão visivelmente cataclísmica, as discontinuidades evolucionárias voltassem a chamar a atenção? Pode-se ir ainda mais longe. O mecanismo mais favorecido por catastrofistas geológicos e paleontológicos na época em que escrevo é o bombardeio vindo do espaço cósmico, isto é, a colisão da terra com um ou mais meteoritos muito grandes. Segundo alguns cálculos, é provável que um asteroide suficientemente grande para destruir a civilização, ou seja, o equivalente a 8 milhões de Hiroximas, chegue a cada 300 mil anos. Tais cenários sempre foram parte de versões marginais da pré-história, mas será que algum cientista sério, antes da época da guerra nuclear, teria pensado nesses termos? Tais teorias da evolução, entendida como lenta mudança interrompida de tempos em tempos por uma mudança relativamente súbita ("equilíbrio pontuado"), continuavam controladas na década de 1990, mas agora faziam parte de um debate *dentro* da comunidade científica. Mais uma vez, o observador leigo não pode deixar de notar o surgimento, dentro do campo de pensamento mais distante da vida humana de carne e osso, de dois subcampos matemáticos conhecidos respectivamente como "teoria da catástrofe" (a partir da década de 1960) e "teoria do caos" (década de 1980) (ver pp. 522 e ss.). O primeiro, um desenvolvimento

da topologia em que a França foi pioneira na década 1960, dizia investigar as situações em que a mudança gradual produzia rupturas súbitas, isto é, a interação entre mudança contínua e descontínua; o outro (de origem americana) modelava a incerteza e imprevisibilidade de situações em que se podia mostrar que acontecimentos aparentemente minúsculos (o adejar das asas de uma borboleta) levavam a resultados imensos em outra parte (um furacão). Os que viveram as últimas décadas do século não tinham dificuldade para entender por que imagens como caos e catástrofe também apareciam nas mentes de cientistas e matemáticos.

V

Contudo, da década de 1970 em diante, o mundo externo passou a intrometer-se mais indiretamente, mas também com mais força, nos laboratórios e salas de conferências, com a descoberta de que a tecnologia baseada na ciência, tendo seu poder multiplicado pela explosão econômica global, parecia na iminência de produzir mudanças fundamentais e talvez irreversíveis no planeta Terra, ou pelo menos na Terra como um habitat para organismos vivos. Isso era ainda mais inquietante que a perspectiva da catástrofe induzida pelo homem, a guerra nuclear, que atormentara imaginações e consciências durante a Guerra Fria; pois uma guerra nuclear soviético-americana era evitável e, como se viu, foi evitada. Não era tão fácil escapar dos subprodutos do crescimento econômico relacionado com a ciência. Assim, em 1973, dois químicos, Rowland e Molina, notaram pela primeira vez que os fluorocarbonos (largamente usados em refrigeração e nos recém-populares aerossóis) consumiam o ozônio na atmosfera da Terra. Difícilmente isso poderia ter sido notado muito mais cedo, pois a liberação desses produtos químicos (CFC 11 e CFC 12) não totalizava 40 mil toneladas antes do início da década de 1950. (Mas entre 1960 e 1972 mais de 3,6 milhões de toneladas deles haviam entrado na atmosfera.)^{*} Contudo, no início da década de 1990 a existência de grandes "buracos de ozônio" na atmosfera era do conhecimento de leigos, e a única questão era saber com que rapidez ia prosseguir o esgotamento da camada de ozônio, e quando ultrapassaria os poderes de recuperação natural da Terra. Se se eliminassem os CFCs, ninguém tinha dúvidas de que ela reapareceria. O "efeito estufa", ou seja, o incontrolável esquentamento da temperatura global pela liberação de gases produzidos pelo homem, que começou a ser discutido a sério por volta de 1970, tornou-se uma preocupação importante de especialistas e políticos na década de 1980 (Smil, 1990); o perigo era real, embora às vezes muito exagerado.

(*) *World Resources*, 1986, tabela 11.1, p. 319.

Mais ou menos na mesma época a palavra “ecologia”, cunhada em 1873 para o ramo da biologia que tratava das inter-relações de organismos e seus ambientes, adquiriu sua hoje familiar conotação quase política (E. M. Nicholson, 1970). * Eram as consequências naturais do *superboom* econômico secular (ver capítulo 9).

Essas preocupações seriam o suficiente para explicar por que a política e a ideologia começaram mais uma vez a cercar as ciências naturais na década de 1970. Contudo, começaram a penetrar até mesmo em ramos das próprias ciências, em forma de debates sobre a necessidade de limitações práticas e morais à investigação científica.

Jamais, desde o fim da hegemonia teológica, tais questões haviam sido levantadas a sério. Não surpreendentemente, vieram daquela parte das ciências naturais que sempre tivera, ou parecera ter, implicação direta sobre os assuntos humanos: genética e biologia evolucionária. Pois dez anos após a Segunda Guerra Mundial as ciências da vida foram revolucionadas pelos espantosos avanços da biologia molecular, que revelaram o mecanismo universal de herança, o “código genético”.

A revolução na biologia molecular não foi inesperada. Depois de 1914, podia-se ter como certo que a vida podia e tinha de ser explicada em termos de física e química, e não em termos de alguma essência peculiar aos seres vivos.** Na verdade, modelos bioquímicos da possível origem da vida na Terra, começando com luz do sol, metano, amônia e água, foram sugeridos na década de 1920 (em grande parte com intenções anti-religiosas) na Rússia soviética e na Grã-Bretanha, e puseram o assunto na pauta científica séria. A hostilidade à religião, a propósito, continuou a animar os pesquisadores nesse campo: tanto Crick quanto Linus Pauling são exemplos disso (Olby, 1970, p. 943). O grande impulso de pesquisa biológica há décadas era bioquímico, e cada vez mais físico, desde o reconhecimento de que se podiam cristalizar as moléculas de proteína, e portanto analisá-las cristalograficamente. Sabia-se que uma substância, o ácido desoxirribonucleico (DNA), desempenhava um papel, possivelmente o central, na hereditariedade: parecia ser o componente básico do gene, a unidade de herança. O problema de como o gene “causa(va)” a síntese de outra estrutura igual a si, em que mesmo as mutações do gene original são copiadas” (Muller, 1951, p. 95), isto é, de como operava a hereditariedade, já se achava sob séria investigação em fins da década de 1930. Após a guerra, era claro que, nas palavras de Crick, “grandes coisas estavam logo após a esquina”. O brilhantismo da descoberta por Crick e Watson da estrutura em dupla hélice

(*) “Ecologia [...] é também a principal disciplina e ferramenta intelectual que nos possibilita esperar que a evolução humana possa ser mudada, possa ser voltada em nova direção, para que o homem deixe de destruir o ambiente do qual depende seu próprio futuro.”

(**) “Como podem os fatos, no espaço e no tempo, que ocorrem dentro do limite espacial de um organismo vivo ser explicados pela física e a química?” (Schrödinger, 1944, p. 2).

do DNA e da maneira como explicava a “cópia de gene” com um elegante modelo químico-mecânico não é diminuído pelo fato de que vários pesquisadores convergiam para o mesmo resultado no início da década de 1950.

A revolução do DNA, “a maior descoberta individual da biologia” (J. D. Bernal), que dominou as ciências da vida na segunda metade do século, foi essencialmente na genética e, como o darwinismo do século XX é exclusivamente genético, na evolução.* Estes são dois temas notoriamente delicados, tanto porque os próprios modelos científicos são frequentemente ideológicos em tais campos — lembramos a dívida de Darwin com Malthus (Desmond & Moore, capítulo 18) — quanto porque habitualmente descambam para a política (“darwinismo social”). O conceito de “raça” ilustra essa interação. A lembrança das políticas raciais nazistas tornou praticamente impensável que intelectuais liberais (o que incluía a maioria dos cientistas) operassem com esse conceito. Na verdade, muitos duvidavam que ele fosse legítimo até para investigar de modo sistemático diferenças geneticamente determinadas entre grupos humanos, por receio de que os resultados oferecessem encorajamento a opiniões racistas. Mais geralmente, nos países ocidentais a ideologia pós-fascista de democracia e igualdade reviveu os velhos debates de “natureza *versus* alimentação”, ou hereditariedade *versus* ambiente. Visivelmente, o indivíduo humano era formado tanto pela hereditariedade quanto pelo ambiente, pelo genes e a cultura. Contudo, os conservadores estavam simplesmente demasiado dispostos a aceitar uma sociedade de desigualdades irremovíveis, isto é, geneticamente determinadas, enquanto a esquerda, comprometida com a igualdade, naturalmente afirmava que todas as desigualdades podiam ser eliminadas pela ação social: eram, no fundo, ambientalmente determinadas. A controvérsia pegou fogo na questão da inteligência humana, que (devido a suas implicações para a educação escolar seletiva e universal) era altamente política. Suscitou questões muito mais amplas que as de raça, embora se referisse também a elas. A medida de sua amplitude surgiu com a revivência do movimento feminista (ver capítulo 10), do qual várias ideólogas chegaram perto de afirmar que *todas* as diferenças mentais entre homens e mulheres eram essencialmente determinadas pela cultura, ou seja, ambientais. Na verdade, a substituição, que entrou na moda, do termo “sexo” por “gênero”, implicava a crença em que “mulher” era não tanto uma categoria biológica quanto um papel social. Um cientista que tentasse investigar esses temas sensíveis sabia estar em campo minado político. Mesmo os que entraram nele deliberadamente, como E. O. Wilson, de Harvard (1929-), defensor da “sociobiologia”, evitavam falar com clareza.**

(*) Foi também “sobre” a variante essencialmente matemático-mecânica da ciência experimental, talvez o motivo pelo qual não encontrou 100% de entusiasmo em algumas ciências da vida menos prontamente quantificáveis, como a zoologia e a paleontologia (ver Lewontin, 1973).

(**) “Minha impressão geral, extraída da informação existente, é que o *Homo sapiens* é um animal típico da espécie com referência à qualidade e magnitude da diversidade genética que afeta o comportamento. Se a comparação é correta, a unidade psíquica da humanidade foi reduzida em

O que tornava a atmosfera mais explosiva era que os próprios cientistas, sobretudo na ala mais obviamente social da ciência — teoria da evolução, ecologia, etologia ou estudo de comportamento social animal, e coisas assim —, eram simplesmente demasiadamente inclinados a usar metáforas antropomórficas ou extrair conclusões humanas. Os sociobiólogos, ou os que popularizavam suas descobertas, sugeriam que as características (masculinas) herdadas dos milênios durante os quais o homem primitivo fora selecionado para adaptar-se, como caçador, a uma existência mais predatória em habitats abertos (Wilson, 1977) ainda dominavam nossa existência social. Não só as mulheres, mas também os historiadores ficaram irritados. Os teóricos evolucionistas analisavam a seleção natural, à luz da grande revolução biológica, como a luta pela existência do “Gene Egoísta” (Dawkins, 1976). Até mesmo alguns que simpatizavam com a versão pesada do darwinismo se perguntavam que importância real tinha a seleção genética para debates sobre egoísmo, competição e cooperação humanos. A ciência achava-se uma vez mais acuada por críticos, embora — significativamente — não estivesse mais sob fogo da religião tradicional, além de grupos fundamentalistas intelectualmente sem importância. O clero aceitava agora a hegemonia do laboratório, extraindo o conteúdo teológico que podia da cosmologia científica, cujas teorias de “big-bang” podiam, com o olho da fé, ser apresentadas como prova de que um Deus criara o mundo. Por outro lado, a revolução cultural ocidental das décadas de 1960 e 1970 produziu um forte ataque neo-romântico e irracionalista à visão científica do mundo, que podia passar prontamente de um tom radical para um reacionário.

Ao contrário das trincheiras avançadas das ciências da vida, a principal fortaleza de pesquisa pura nas ciências “pesadas” pouco foi perturbada por tais franco-atiradores até tornar-se evidente, na década de 1970, que não se podia divorciar a pesquisa das consequências sociais das tecnologias que ela agora, e quase imediatamente, gerava. Foi a perspectiva de “engenharia genética” — logicamente de formas de vida humana e outras — que na verdade suscitou a questão imediata de se deviam considerar limitações à pesquisa científica. Pela primeira vez, ouviram-se essas opiniões entre os próprios cientistas, notadamente no campo biológico, pois a essa altura alguns dos elementos essenciais das tecnologias do tipo Frankenstein não eram separáveis da pesquisa pura e a ela subsequentes, mas — como no projeto do Genoma, plano de mapeamento de todos os genes da hereditariedade humana — eram a pesquisa básica. Essas críticas solaparam o que todos os cientistas encaravam até

status de dogma para hipótese testável. Isso não é fácil de dizer no atual ambiente político dos Estados Unidos, e é encarado como uma heresia punível em alguns setores da comunidade acadêmica. Mas a idéia precisa ser encarada de frente, se as ciências sociais querem ser inteiramente honestas [...] Será melhor os cientistas estudarem o tema da diversidade comportamental genética do que manter uma conspiração de silêncio por boas intenções” (Wilson, 1977, p. 133).

O significado claro deste tortuoso trecho é: há raças, e por motivos genéticos elas são permanentemente desiguais em certos aspectos especificáveis.

então, e a maioria continuou a encarar, como o princípio básico da ciência, ou seja, o de que, com as mais marginais concessões às crenças morais da sociedade,* a ciência devia buscar a verdade aonde quer que essa verdade a levasse. Eles não eram responsáveis pelo que os não-cientistas faziam com seus resultados. O fato de que, como observou um cientista americano em 1992, “nenhum biólogo molecular importante que conheço deixa de ter interesse financeiro no negócio da biotecnologia” (Lewontin, 1992, p. 37; pp. 32-40); de que — para citar outro — “a questão (da propriedade) está no âmago de tudo que fazemos” (Lewontin, 1992, p. 38) tornava a alegação de pureza ainda mais duvidosa.

O que estava em causa agora não era a busca da verdade, mas a impossibilidade de separá-la de suas condições e consequências. Ao mesmo tempo, o debate era essencialmente entre pessimistas e otimistas em relação à raça humana. Pois a crença básica dos que pensavam em restrições ou autolimitações à pesquisa científica era que a humanidade, como hoje organizada, não era capaz de lidar com os seus poderes de transformação da Terra, ou mesmo de reconhecer os riscos que corria. Pois mesmo os feiticeiros que resistiam a toda limitação em suas pesquisas não confiavam em seus aprendizes. Os argumentos em favor da investigação ilimitada “referem-se à pesquisa científica básica, não às aplicações tecnológicas da ciência, algumas das quais devem ser restringidas” (Baltimore, 1978).

E no entanto, tais argumentos não chegavam à questão. Pois, como sabiam todos os cientistas, a pesquisa científica não era ilimitada e livre, quando nada por que exigia recursos que eram limitados. A questão não era se alguém devia dizer aos pesquisadores o que fazer, mas quem impunha esses limites e orientações, e por quais critérios. Para a maioria dos cientistas, cujas instituições eram direta ou indiretamente pagas com verbas públicas, esses controladores de pesquisa eram os governos, cujos critérios, por mais sinceros que fossem em sua dedicação aos valores da livre investigação, não eram os de Planck, Rutherford ou Einstein.

As prioridades deles não eram, por definição, as da pesquisa “pura”, sobretudo quando essa pesquisa era cara: e, após o fim do grande *boom* global, até mesmo os governos mais ricos, com suas rendas não mais crescendo à frente dos gastos, não tinham orçamento. Tampouco eram, ou podiam ser, as prioridades da pesquisa “aplicada”, que empregava a grande maioria dos cientistas, pois essas não eram postas em termos de “avanço do conhecimento”, em geral (embora bem pudessem resultar nisso), mas da necessidade de atingir determinados resultados práticos — por exemplo, a cura do câncer ou da Aids. Os pesquisadores nesses campos buscavam não necessariamente o que lhes interessava, mas o que era socialmente útil ou economicamente lucrativo, ou aquilo para que havia dinheiro, mesmo quando esperavam que isso os le-

(*) Como, notadamente, a restrição a experiências com seres humanos.

vasse de volta ao caminho da pesquisa fundamental. Nas circunstâncias, não passava de retórica vazia declarar intoleráveis as restrições à pesquisa porque o homem era por natureza uma espécie que precisava "satisfazer nossa curiosidade, exploração e experimentação" (Lewis Thomas, in Baltimore, 1978, p. 44), ou porque os picos de conhecimento deviam ser escalados, na expressão clássica dos montanhistas, "porque estão lá".

A verdade é que a "ciência" (com o que muita gente quer dizer as ciências naturais "pesadas") estava demasiado grande, demasiado poderosa, demasiado indispensável à sociedade em geral e a seus pagadores em particular para ser deixada entregue a seus próprios cuidados. O paradoxo de sua situação era que, em última análise, a imensa casa de força que era a tecnologia do século XX, e a economia que ela tornava possível, dependiam cada vez mais de uma comunidade relativamente minúscula de pessoas para as quais essas conseqüências titânicas de suas atividades eram secundárias, e muitas vezes triviais. Para elas, a capacidade dos homens de viajar para a lua, ou refletir as imagens de uma partida de futebol brasileira por meio de um satélite para serem vistas numa tela em Düsseldorf, era muito menos interessante que a descoberta de um ruído cósmico de fundo que fora identificado durante a busca de fenômenos que perturbavam as comunicações, mas confirmava uma teoria sobre as origens do universo. Contudo, como o antigo matemático grego Arquimedes, elas sabiam que viviam e ajudavam a moldar um mundo que não podia entender nem ligava para o que faziam. Seu apelo por liberdade de pesquisa era o *cri-de-coeur* de Arquimedes aos soldados invasores, contra os quais ele inventara engenhos militares para sua cidade de Siracusa, e que não tomaram conhecimento deles ao matá-lo: "Pelo amor de Deus, não estraguem meus diagramas". Era compreensível, mas não necessariamente realista.

Só os poderes transformadores do mundo, dos quais elas tinham a chave, as protegiam, pois esses pareciam depender de que se deixasse uma elite, fora isso incompreensível e privilegiada — incompreensível, até o fim do século, mesmo em sua relativa falta de interesse pelos sinais externos de riqueza e poder —, seguir seu caminho em paz. Todos os Estados do século XX que haviam agido de outro modo tinham motivo para lamentá-lo. Todos os Estados portanto apoiavam a ciência, que, ao contrário das artes e da maioria das humanidades, não podia funcionar de fato sem esse apoio, ao mesmo tempo evitando interferir até onde possível. Mas os governos não estão interessados na verdade última (a não ser da ideologia ou religião), mas na verdade instrumental. No máximo, podiam promover a pesquisa "pura" (isto é, no momento inútil) porque ela poderia um dia produzir alguma coisa útil, ou por motivos de prestígio nacional, em que a busca de Prêmios Nobel vinha antes da de medalhas olímpicas e ainda continua mais altamente valorizada. Essas eram as bases nas quais as triunfantes estruturas da pesquisa e da teoria científicas se erguiam, e pelas quais o século XX será lembrado como uma era de progresso humano, e não, basicamente, de tragédia humana.

RUMO AO MILÊNIO

Estamos no início de uma nova era, caracterizada por grande insegurança, crise permanente e ausência de qualquer tipo de status quo [...] Devemos compreender que nos encontramos numa daquelas crises da história mundial que Jakob Burckhardt descreveu. Não é menos significativa que a de depois de 1945, embora as condições iniciais para superá-la pareçam melhores hoje. Não há potências vitoriosas nem derrotadas hoje, nem mesmo na Europa Oriental.

M. Stürmer, in Bergedorf (1993, p. 59)

Embora o terreno ideal do socialismo-comunismo tenha desmoronado, os problemas que ele pretendeu resolver permanecem: o uso descarado da vantagem social e o desordenado poder do dinheiro, que muitas vezes dirige o curso mesmo dos acontecimentos. E se a lição global do século XX não servir como uma vacina curativa, o imenso turbilhão vermelho pode repetir-se em sua totalidade.

Alexander Soljenitsin, in *The New York Times*, 28/11/1993

É um privilégio para um escritor ter presenciado o fim de três Estados: a República de Weimar, o Estado fascista e a RDA. Não creio que eu viva o bastante para ver o fim da República Federal.

Heiner Müller (1992, p. 361)

I

O Breve Século XX acabou em problemas para os quais ninguém tinha, nem dizia ter, soluções. Enquanto tateavam o caminho para o terceiro milênio em meio ao nevoeiro global que os cercava, os cidadãos do *fin-de-siècle* só sabiam ao certo que acabara uma era da história. E muito pouco mais.

Assim, pela primeira vez em dois séculos, faltava inteiramente ao mundo da década de 1990 qualquer sistema ou estrutura internacional. O fato mesmo