

Fábio Prá da Silva de Souza

**CONCEITOS DE SIMULTANEIDADE, DA ANTIGUIDADE À  
RELATIVIDADE: UM MÓDULO DE ENSINO  
CONTEXTUALIZADO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Educação Científica e Tecnológica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de mestre em Educação Científica e Tecnológica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz O. Q. Peduzzi

Florianópolis  
2016

Souza, Fábio Pra da Silva de  
Conceitos de simultaneidade, da Antiguidade à  
Relatividade : um módulo de ensino contextualizado / Fábio  
Pra da Silva de Souza ; orientador, Luiz O. Q. Peduzzi -  
Florianópolis, SC, 2016.  
292 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas.  
Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica.

Inclui referências

1. Educação Científica e Tecnológica. 2. Simultaneidade.  
3. Relatividade. 4. Aprendizagem Significativa. 5. História  
e Filosofia da Ciência. I. Peduzzi, Luiz O. Q. . II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós  
Graduação em Educação Científica e Tecnológica. III. Título.





*A Max Jammer, que nos últimos anos  
de sua vida publicou a obra que  
tornou este trabalho possível.*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, que me deram liberdade de escolha para a carreira que escolhi seguir. Ao meu orientador, Professor Luiz O. Q. Peduzzi, pelos ensinamentos e grande paciência durante estes anos, até o último momento. Aos membros da banca de qualificação e defesa, pelas valiosas contribuições. Aos alunos que participaram da pesquisa, por demonstrarem interesse pelo tema e preocupação com a melhoria da educação brasileira.

Agradeço especialmente a minha esposa Mariana, amor da minha vida.





Ao longo dos séculos existiram homens que deram os primeiros passos, por novas estradas, armados com nada além de sua própria visão.

Ayn Rand, 1943



## RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento, a aplicação e avaliação, de um módulo de ensino que aborda a evolução histórica do conceito de simultaneidade, da Antiguidade até o início do século XX. Esse trabalho foi motivado pela necessidade de fomentar uma imagem mais fidedigna sobre a ciência, evitando as simplificações e distorções mais comuns, e também a insuficiência de discussões sobre esse conceito em livros de física geral universitários. O objetivo geral foi o de recontextualizar historicamente o conceito de simultaneidade, visando promover discussões conceituais e epistemológicas sobre o mesmo, em uma disciplina de História da Física. No desenvolvimento desta pesquisa, procedeu-se a um estudo histórico, articulado com uma análise da abordagem do conceito de simultaneidade em livros de física geral utilizados no ensino universitário. Elaborou-se um módulo de ensino potencialmente significativo, que tem como elemento central um texto base de quarenta e quatro páginas, aplicado uma única vez em uma amostra de sete alunos em uma disciplina sobre História da Ciência, da Universidade Federal de Santa Catarina. A avaliação ocorreu nos marcos da pesquisa qualitativa, utilizando uma triangulação de instrumentos: observação livre, conjunto de questões (escrito) e uma entrevista semiestruturada. A análise indicou que o conjunto de questões produziu os dados mais satisfatórios, em que aproximadamente três quartos das respostas atingiram os objetivos propostos. Foi possível identificar diversas posições conceituais e epistemológicas dos alunos, relativas ao desenvolvimento histórico do conceito de simultaneidade. Em geral, os alunos sinalizaram a importância de rediscutir o conceito de simultaneidade à luz de seu percurso histórico. Apesar da pequena amostra de alunos, os resultados iniciais desta aplicação mostraram que o tema é bastante fértil e indicam a continuidade da exploração do tema em pesquisas futuras.

**Palavras-chave:** Simultaneidade, Relatividade, Aprendizagem Significativa, História e Filosofia da Ciência.



## ABSTRACT

This thesis proposes the development, implementation and evaluation of a teaching module that addresses the historical evolution of the concept of simultaneity - from antiquity to the early 20th century. This project was fostered to sustain a more reliable picture of science, avoiding ordinary simplifications and distortions, and also enhance attention for this concept in its historiographic frame on university general physics books. The overall objective was to historically approach the concept of simultaneity, promote conceptual and epistemological critical analysis in a History of Physics course. The research was based on a historical review of the concept of simultaneity and how this issue was assessed in higher education general physics books. A potentially meaningful teaching module was designed and applied in a seven-sample students History of Science course class, at Universidade Federal de Santa Catarina. The evaluation was based on qualitative research endorsed by triangulation tools: free observation, questionnaire and semi-structured interview. Data analysis indicated that the questionnaire achieved satisfactory goals, nearly three quarters of the responses reached the aimed objectives. It was possible to identify that the students made several conceptual and epistemological appointments during the process. Finally, the students concluded that is particularly important re-discuss the concept of simultaneity in the light of its historical progress. Despite the small students sample, the results of this application showed that this theme is very fertile and can be continued in a future research.

**Keywords:** Simultaneity, Relativity, Meaningful Learning, History and Philosophy of Science.



## LISTA DE FIGURAS

|   |     |
|---|-----|
| Figura 1: Aquiles e a Tartaruga.....  | 59  |
| Figura 2: Estádio.....  | 61  |
| Figura 3: Simultaneidade.....   | 97  |
| Figura 4: Transposição Didática.....  | 115 |
| Figura 5: Aquiles e a Tartaruga.....  | 169 |
| Figura 6: Estádio.....  | 170 |
| Figura 7: Sexto Empírico e a refutação da Astrologia.....   | 173 |
| Figura 8: Santo Agostinho e a refutação da Astrologia.....  | 175 |
| Figura 9: Avicena, gravura, por Georg Paul Busch (1720). Museu Nacional Germânico, Nuremberg.....   | 178 |
| Figura 10: Averroes, detalhe da pintura O Triunfo de Santo Tomás de Aquino, de Andrea di Bonaiuto. Igreja de Santa Maria Novella, Florença..... | 179 |
| Figura 11: Bernardino Telesio, gravura.....   | 180 |
| Figura 12: Pierre Gassendi, pintura, por Louis-Édouard Rioult. Museu Nacional Châteaux de Versailles, França.....                               | 182 |
| Figura 13: O método de Eratóstenes.....   | 184 |
| Figura 14: Nau de Pedro Álvares Cabral, ilustração.....   | 185 |
| Figura 15: Reinerus Gemma, gravura, por Esme de Boulonois.....  | 186 |
| Figura 16: Meridianos.....  | 187 |
| Figura 17: Tratado de Tordesilhas.....  | 189 |
| Figura 18: Relógio de Sol, de água, ampulheta e de vela.....  | 190 |
| Figura 19: Relógio portátil, período da Renascença.....   | 190 |
| Figura 20: Relógio de Huygens (1657).....   | 192 |
| Figura 21: Determinação da velocidade da luz.....   | 194 |
| Figura 22: Método da paralaxe.....  | 195 |
| Figura 23: H1 (à esquerda) e H5 (à direita).....  | 197 |
| Figura 24: Isaac Barrow, pintura, por David Loggan (1676).....  | 199 |
| Figura 25: Isaac Newton, pintura, por Godfrey Kneller (1702).....   | 202 |
| Figura 26: Gottfried Leibniz, pintura, por Bernhard Christoph Francke (1695).....   | 205 |
| Figura 27: Linha do tempo.....  | 207 |
| Figura 28: A simultaneidade como convenção.....   | 207 |
| Figura 29: Immanuel Kant, caricatura, por Fernando Romeiro.....   | 208 |
| Figura 30: Henri Poincaré, fotografia.....  | 210 |
| Figura 31: Equações de Maxwell na forma integral.....   | 214 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 32: Transformadas de Galileu e Lorentz.....     | 216 |
| Figura 33: Definição de simultaneidade de 1905.....    | 222 |
| Figura 34: Relatividade da simultaneidade de 1905..... | 223 |
| Figura 35: Definição da simultaneidade de 1917.....    | 227 |
| Figura 36: Experimento do trem-estação.....            | 228 |
| Figura 37: Distribuição das disciplinas.....           | 239 |



## **LISTA DE TABELAS**

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1: Distribuição das publicações.....                   | 30  |
| Tabela 2: Relação dos periódicos pesquisados.....             | 38  |
| Tabela 3: Categorização dos trabalhos encontrados.....        | 39  |
| Tabela 4: Resumo dos trabalhos.....                           | 40  |
| Tabela 5: Referências analisadas.....                         | 119 |
| Tabela 6: Estrutura do módulo de ensino.....                  | 161 |
| Tabela 7: Categorias das disciplinas.....                     | 239 |
| Tabela 8: Codificação dos alunos.....                         | 241 |
| Tabela 9: Categorização a priori das unidades de análise..... | 250 |



## **LISTA DE ABREVIATURAS**

EC – Ensino de Ciências

FAI – Física Auto-Instrutiva

HFC – História e Filosofia da Ciência

PBEF – Projeto Brasileiro de Ensino de Física

PEF – Projeto de Ensino de Física

PSSC – Physical Science Study Committee

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina



## SUMÁRIO

|  |     |
|--|-----|
| INTRODUÇÃO.....  | 23  |
| 1 HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA: DA REAPROXIMAÇÃO<br>COM O ENSINO ÀS SETE VISÕES DEFORMADAS DO<br>TRABALHO CIENTÍFICO..... | 27  |
| 1.1 A REAPROXIMAÇÃO COM O ENSINO.....  | 27  |
| 1.2 AS SETE VISÕES DEFORMADAS DA CIÊNCIA.....  | 32  |
| 2 A EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE SIMULTANEIDADE:<br>SUBSÍDIOS PARA DISCUSSÕES CONCEITUAIS E<br>EPISTEMOLÓGICAS.....               | 55  |
| 2.1 O CONCEITO DE SIMULTANEIDADE NA ANTIGUIDADE.....   | 57  |
| 2.2 CONCEITOS MEDIEVAIS DE SIMULTANEIDADE.....   | 66  |
| 2.3 O CONCEITO DE SIMULTANEIDADE NOS SÉCULOS XVI E<br>XVII.....  | 70  |
| 2.4 O CONCEITO DE SIMULTANEIDADE NA FÍSICA<br>CLÁSSICA.....  | 74  |
| 2.5 A TRANSIÇÃO PARA O CONCEITO RELATIVISTA DE<br>SIMULTANEIDADE.....  | 84  |
| 2.6 SIMULTANEIDADE NA RELATIVIDADE ESPECIAL.....   | 90  |
| 3 A SIMULTANEIDADE NOS LIVROS DE FÍSICA BÁSICA DE<br>MECÂNICA E RELATIVIDADE RESTRITA.....                                   | 109 |
| 3.1 A TEORIA DA TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA.....   | 109 |
| 3.2 A ANÁLISE DOS LIVROS DE FÍSICA BÁSICA.....   | 117 |
| 3.2.1 TEMPO E SIMULTANEIDADE NA MECÂNICA PRÉ-<br>RELATIVÍSTICA.....  | 121 |
| 3.2.2 TEMPO E SIMULTANEIDADE NA INTRODUÇÃO À<br>RELATIVIDADE RESTRITA.....   | 132 |
| 3.3 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES.....   | 147 |
| 4 MÓDULO DE ENSINO.....  | 151 |
| 4.1 - A TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA.....  | 151 |
| 4.2 CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES.....   | 155 |
| 4.3 ESTRUTURA E COMPONENTES DO MÓDULO DE ENSINO<br>.....   | 160 |
| 5 TEXTO BASE.....  | 165 |
| 5.1 - INTRODUÇÃO.....  | 165 |
| 5.2 – ANTIGUIDADE: AS PRIMEIRAS CONCEPÇÕES DE<br>TEMPO E SIMULTANEIDADE.....   | 166 |
| 5.3 – A IDADE MÉDIA E RENASCENÇA: A UNICIDADE DO   |     |

|   |     |
|---|-----|
| TEMPO.....  | 176 |
| 5.4 – SIMULTANEIDADE NAS MEDIÇÕES: UM CONCEITO<br>SUBJACENTE.....                       | 182 |
| 5.5 – FÍSICA CLÁSSICA: NEWTON E O TEMPO ABSOLUTO.....                                   | 198 |
| 5.6 – FÍSICA CLÁSSICA: CRÍTICAS À NEWTON E O PRINCÍPIO<br>DA ANTECEDÊNCIA DA CAUSA..... | 203 |
| 5.7 – A SIMULTANEIDADE NA RELATIVIDADE RESTRITA.....                                    | 219 |
| 6 METODOLOGIA.....  | 235 |
| 6.1 ORIENTAÇÕES METODOLÓGICAS.....  | 235 |
| 6.2 O CONTEXTO DE APLICAÇÃO E OS SUJEITOS DA<br>PESQUISA.....                           | 237 |
| 6.3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO.....   | 241 |
| 7 RESULTADOS E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS.....  | 249 |
| 7.1 OBSERVAÇÃO LIVRE.....   | 250 |
| 7.1.1 O PRIMEIRO E SEGUNDO ENCONTROS.....   | 250 |
| 7.1.2 O TERCEIRO ENCONTRO.....  | 253 |
| 7.1.3 O QUARTO ENCONTRO.....  | 256 |
| 7.1.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A OBSERVAÇÃO LIVRE.....                                       | 259 |
| 7.2 RESULTADOS E ANÁLISE DO CONJUNTO DE QUESTÕES<br>E ENTREVISTA.....                   | 260 |
| 7.2.1 QUESTÃO 1a (Q1a).....   | 261 |
| 7.2.2 QUESTÃO 1b (Q1b).....   | 262 |
| 7.2.3 QUESTÃO 2 (Q2).....   | 263 |
| 7.2.4 ANÁLISE DA QUESTÃO 3 (Q3).....  | 264 |
| 7.2.5 QUESTÃO 4 (Q4).....   | 266 |
| 7.2.6 QUESTÃO 5 (Q5).....   | 269 |
| 7.2.7 QUESTÃO 6 (Q6).....   | 270 |
| 7.2.8 QUESTÃO 7 (Q7).....   | 270 |
| 7.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O QUESTIONÁRIO E A<br>ENTREVISTA.....                           | 271 |
| 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....   | 273 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 277 |

## INTRODUÇÃO

A noção de simultaneidade é utilizada, desde a Antiguidade, na construção de uma imagem consistente sobre a realidade física, pois ela

já estava na mente da humanidade antes mesmo de sua articulação consciente, quando na aurora da civilização o homem pré-histórico observou as estrelas no céu e pensou que elas estivessem onde ele as viu, e concebeu o “agora”, o “exato momento”. Com esta concepção, sua mente implicitamente deduziu a noção de simultaneidade não-local como uma componente necessária do seu processo mental de distinguir a si mesmo do mundo que o rodeava (JAMMER, 2006, p. 16, tradução nossa).

Algumas das primeiras referências sobre esse assunto são encontradas na Antiguidade, por exemplo, nos comentários de Aristóteles contra os 4 Paradoxos de Zenão, na medida da circunferência da Terra feita por Eratóstenes ou nas refutações da Astrologia propostas por Sexto Empírico e Santo Agostinho.

No período mais recente, a partir da Renascença, a noção de simultaneidade esteve presente no método de Gemma da determinação da longitude em alto mar, em discussões filosóficas sobre o tempo (Leibniz e Kant), na medição da velocidade da luz por Roemer e na determinação das distâncias interplanetárias por Cassini.

Já na Física Moderna, no início do século XX, esse conceito desempenhou um papel crítico na formulação da Relatividade Restrita de Einstein, em especial porque esta é uma teoria que mudou fundamentalmente a concepção da realidade física, contendo uma *definição* de simultaneidade.

Considerando a importância deste conceito, surge um questionamento: como ele é tratado (discutido) no âmbito do ensino universitário de física básica? Em uma análise preliminar, realizada nos livros universitários de física básica, constatou-se que este conceito costuma ser enfatizado somente quando se pretende abordar a Relatividade Restrita. Essa aparente omissão dos livros-texto induz ao estudante, principalmente, a existência de um salto conceitual histórico entre Newton e Einstein, prejudicando a formação de uma imagem mais

adequada do empreendimento científico. A evolução histórica deste conceito suscita discussões conceituais que poderiam melhorar a compreensão da diferença entre o quadro conceitual da Mecânica Newtoniana e da Relatividade Restrita.

A inspiração deste trabalho de mestrado é a obra de Max Jammer, intitulada *Concepts of Simultaneity: From Antiquity to Einstein and Beyond* (Conceitos de Simultaneidade: da Antiguidade até Einstein e Além) (JAMMER, 2006). Esta obra apresenta uma análise abrangente, coerente, crítica e bastante documentada do desenvolvimento conceitual da simultaneidade, desde a Antiguidade até a Física contemporânea. Sua leitura e estudo sugere que há muito sobre esse conceito que costuma ser ignorado no ensino de Física, apesar de possuir uma história riquíssima e desempenhar um papel importante no desenvolvimento da Física como um todo. A procura por um ensino contextualizado e humanizado, a riqueza histórica deste conceito evidenciada por Jammer (2006) e seu papel importante em toda a Física, justificam uma presença maior deste conceito na formação de físicos.

A intenção desta pesquisa é trazer contribuições da História e Filosofia da Ciência (HFC) para a formação inicial de professores de Física (graduação). Entretanto, o público alvo não se restringirá apenas aos licenciados, que atuam majoritariamente na Educação Básica. Para que a inclusão da HFC se torne progressivamente maior na educação científica, é preciso não esquecer dos futuros bacharéis, pois como pesquisadores e professores em instituições de ensino superior, também lecionarão. Esse trabalho objetivou responder a seguinte questão de pesquisa:

**Como promover discussões conceituais e epistemológicas, na formação inicial de futuros professores e cientistas, a partir de uma recontextualização histórica do conceito de simultaneidade?**

Na busca de respostas a esta questão, o estudo tem como **objetivo geral recontextualizar historicamente o conceito de simultaneidade, promovendo discussões conceituais e epistemológicas sobre o mesmo, em uma disciplina de história da Física**. Para a consecução desse objetivo, delinearam-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar questões conceituais, históricas e epistemológicas relevantes, relativas ao conceito de simultaneidade, a partir do livro *Concepts of Simultaneity* (JAMMER, 2006);
- Analisar o conceito de simultaneidade apresentado em livros-



texto de Física, de nível universitário básico, utilizando a teoria da Transposição Didática de Chevallard (1991), considerando as questões conceituais, históricas e epistemológicas identificadas anteriormente;

- Elaborar um módulo de ensino que promova: (1) uma ressignificação do conceito de simultaneidade no ensino da Física, com base na teoria de Ausubel (2003), considerando a análise dos livros-texto realizada anteriormente; (2) discussões histórico-filosóficas acerca da evolução do conceito de simultaneidade;
- Aplicar o módulo de ensino em uma disciplina sobre a história da Física;
- Avaliar a aplicação do módulo de ensino.

A dissertação está dividida em oito capítulos. No primeiro, realiza-se uma retrospectiva da reaproximação da HFC no Ensino de Ciências (EC), dos anos oitenta até o presente. Esse período é discutido levando-se em conta, principalmente, diversos trabalhos da última década que consideram as sete visões deformadas do trabalho científico na educação científica (GIL-PEREZ *et al.*, 2001). Essas visões são fundamentadas “a partir da consideração do que têm em comum as diversas perspectivas e teses epistemológicas de autores como Popper (1962), Kuhn (1971), Bunge (1976), Tolmin (1977), Lakatos (1982), Laudan (1984), Giere (1988)” (GIL-PEREZ *et al.*, 2001). Tal discussão busca fundamentar epistemologicamente a pesquisa histórica sobre o desenvolvimento do conceito de simultaneidade, realizada no capítulo seguinte.

No segundo capítulo, elaborase um estudo sobre a evolução histórica do conceito de simultaneidade, da Antiguidade até o início do século XX, quando da formulação da Relatividade Restrita por Albert Einstein, buscando subsídios conceituais e epistemológicos relevantes para a ressignificação do conceito de simultaneidade, conforme a teoria da Aprendizagem Significativa (AUSUBEL, 2003), no âmbito da Física. Esse estudo identificou e discutiu episódios históricos onde o conceito de simultaneidade apresenta um papel conceitualmente relevante, e também busca por contra-exemplos das visões deformadas da ciência apresentadas por Gil-Perez *et al.* (2001). É utilizada como obra de referência o livro *Concepts of Simultaneity* (JAMMER, 2006).

No terceiro capítulo, analisa-se livros universitários de física

geral, presentes nas bibliografias das disciplinas de Física Geral I e IV, que abordam Mecânica Newtoniana e Relatividade Restrita, dos cursos de Licenciatura em Física e Bacharelado em Física da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Utiliza-se, nesta análise, a Teoria da Transposição Didática de Chevallard (1991), buscando-se evidenciar narrativas descontextualizadas e dessincronizadas. Foi possível identificar o uso majoritariamente implícito da noção de simultaneidade na abordagem da Física Clássica, pouquíssima contextualização histórica e falta de clareza entre o quadro conceitual newtoniano e einsteniano.

No quarto capítulo, descreve-se a estrutura e os elementos da intervenção didática (módulo de ensino). Discute-se em especial a construção do texto base, utilizado como elemento central do módulo de ensino, elaborado conforme as discussões histórico-filosóficas e conceituais dos capítulos anteriores. No quinto capítulo, apresenta-se o texto base construído para o módulo de ensino.

No sexto capítulo, discute-se a metodologia de aplicação e avaliação da intervenção didática, que ocorreu na disciplina de Evolução dos Conceitos da Física, obrigatória para os alunos dos cursos de Licenciatura e Bacharelado em Física da UFSC.

No sétimo capítulo, avalia-se a intervenção didática através do uso de observação livre, conjunto de questões e entrevista semiestruturada. Os melhores dados apareceram no conjunto de questões, em que aproximadamente  $\frac{3}{4}$  das respostas se enquadraram nos objetivos propostos, o que indica potencialidades do tema para fomentar discussões conceituais e epistemológicas.

No oitavo e último capítulo faz-se um balanço geral, levando em conta os objetivos propostos, a construção do módulo de ensino e os resultados coletados em sua aplicação. Apesar do pequeno número da amostra, somente sete alunos, os resultados obtidos mostraram que o tema é fértil e sugerem novas investigações com a aplicação o módulo de ensino em outros contextos educacionais, como em disciplinas de introdução à Relatividade Restrita.

# **1 HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA: DA REAPROXIMAÇÃO COM O ENSINO ÀS SETE VISÕES DEFORMADAS DO TRABALHO CIENTÍFICO.**

## **1.1 A REAPROXIMAÇÃO COM O ENSINO**

Os anos sessenta foram marcados pelo surgimento de grandes projetos curriculares de EC em alguns países. Nos Estados Unidos, surgiu o Physical Science Study Commitee (PSSC) e o Project Physics Course (Projeto Harvard) e na Inglaterra, o Nuffield. O Brasil também desenvolveu seus próprios projetos nacionais, que são o Projeto de Ensino de Física (PEF), o Física Auto-Instrutiva (FAI) e o Projeto Brasileiro para o Ensino de Física (PBEF).

Segundo Oliveira (2006), o Projeto Harvard foi utilizado entre 1962 e 1970, até que o governo Nixon modificou a política educacional científica. Este projeto inovou ao possuir uma abordagem histórica e filosófica, que chegou a ser utilizada por 20% a 25% dos estudantes nos Estados Unidos, na época. O projeto ganhou versões, não meras traduções, em vários idiomas, pois segundo Gerald Holton (um dos autores), “acreditávamos que, em cada país, deveria haver um grupo que o ajustasse à cultura do lugar, seus interesses e níveis de matemática” (OLIVEIRA, 2006). Apesar de possuir uma versão em português, para Portugal, o Projeto Harvard não chegou a ser efetivamente introduzido no Brasil.

O Projeto Harvard foi pioneiro em dar ênfase à HFC; no entanto Duschl (1985) fez um estudo relatando que o EC estava se desenvolvendo, nos 25 anos anteriores, bastante dissociado da HFC. Na segunda metade da década de oitenta, começou uma reaproximação entre essas duas áreas. Matthews (1995) corrobora essa reaproximação analisando a quantidade de publicações recentes, eventos realizados e as modificações dos currículos escolares nos Estados Unidos e Inglaterra. No Brasil, essa reaproximação também estava sendo debatida entre pesquisadores, como pode ser observado pela realização do I e II Ciclos de Seminários sobre História da Ciência e Ensino de Física, realizados na Universidade Federal da Santa Catarina (UFSC), nos anos de 1987 e 1988. Esses eventos tiveram várias de suas palestras divulgadas na forma de artigos, nos volumes especiais 5 (1988) e 6 (1989) do Caderno Catarinense de Ensino de Física, editado pelo Departamento de Física da UFSC. Outros trabalhos desta época que discutem a HFC no EC são

Moraes *et al.* (1990), Krasilchik (1990) e Zanetic (1989).

Segundo Matthews (1994), essa reaproximação é em parte a renascença de uma longa tradição liberal, ou contextual, de educação científica, influenciada pelas contribuições de cientistas e educadores como Ernst Mach, Pierre Duhem, Alfred North Whitehead, Percy Nunn, James Conant, Joseph Schwab, Michael Martin, Martin Wagenschein, Gerald Holton e outros.

Um forte argumento em prol de um ensino sobre a ciência é o fato de que o conhecimento científico lida, essencialmente, com objetos teóricos da natureza, através de idealizações, e que estes podem ser substancialmente diferentes dos objetos do mundo real. Nesse caso, há uma diferença entre o mundo da ciência e o mundo cotidiano, do senso comum.

Como exemplo, costuma-se ensinar a lei de isocronismo na oscilação de um pêndulo ideal linear, no qual o período do pêndulo é constante e só depende do comprimento deste e do valor da aceleração da gravidade no local em que se encontra. No entanto, ninguém tem dúvidas que qualquer pêndulo, de qualquer massa e qualquer comprimento, irá cessar sua oscilação depois de algum tempo. Há um aparente antagonismo entre o pêndulo real e o ideal, que deve ser discutido, entendido, apreendido, como parte do processo de aprender Ciências. Sem isso, é provável que "o estudante fique sujeito à infeliz escolha entre renunciar ao seu próprio mundo por ser uma fantasia, ou renunciar ao mundo da Ciência pela mesma razão" (MATTHEWS, 1995). Uma discussão mais aprofundada sobre este ponto é encontrada em Matthews (1990). Apesar da importância desta questão epistemológico-educacional, constata-se que:

No ensino de Ciências, tem-se ignorado, ou minimizado, com uma frequência maior que a desejável, a ruptura epistemológica existente entre a Ciência newtoniana e o senso comum e a realidade quotidiana que nos envolve de modo que se criou um enigma no que tange à aparente incapacidade do sistema de ensino para ensinar o que deve (MATTHEWS, 1995).

Segundo Matthews (1995), muitas críticas foram feitas às primeiras tentativas de uso da HFC no EC, ainda antes da reaproximação dos anos oitenta. Por exemplo, Klein (1972) argumenta

que é impossível conciliar os objetivos do EC com os propósitos do Ensino de História. Conclui que o EC se alimentaria de uma pseudo-história, que será inevitavelmente uma má história, com erros e omissões e que, portanto, seria melhor não incluí-la no EC. Mais tarde Whitaker (1979) aprofunda-se ainda mais no assunto, mostrando diversos exemplos daquilo que chamou de quasi-história, no qual ficções históricas são deliberadamente produzidas nos livros didáticos para finalidades pedagógicas e propagar a visão de ciência do autor, semelhante à ideia de reconstruções racionais de Lakatos. Kuhn (1998) argumentou que o ensino de História da Ciência (HC) poderia abalar, ou enfraquecer, a confiança do estudante no paradigma ao qual ele está sendo iniciado, de tal modo que a HC deveria ser distorcida para parecer que os cientistas do passado estavam trabalhando no mesmo conjunto de problemas que os contemporâneos.

Matthews (1995) faz uma análise profunda dessas críticas, e conclui que há um saldo positivo em favor da HFC. Ele aponta que a contextualização histórica no EC poderia trazer inúmeros benefícios, tais como:

- (1) motiva e atrai os alunos; (2) humaniza a matéria; (3) promove uma compreensão melhor dos conceitos científicos por traçar seu desenvolvimento e aperfeiçoamento; (4) há um valor intrínseco em se compreender certos episódios fundamentais na história da Ciência - a Revolução Científica, o darwinismo, etc.; (5) demonstra que a Ciência é mutável e instável e que, por isso, o pensamento científico atual está sujeito a transformações que (6) se opõem à ideologia científicista; e, finalmente, (7) a história permite uma compreensão mais profícua do método científico e apresenta os padrões de mudança na metodologia vigente (MATTHEWS, 1995).

Outros trabalhos também argumentam em favor do uso da HFC no EC, como Gil-Perez (1993), Vannucchi (1996), Abd-El-Khalick e Lederman (2000), Peduzzi (2001), Acevedo *et al.* (2005), Martins (2006), El-Hani (2006) e Höttecke e Silva (2011).

Os esforços em prol da disseminação da HFC no EC continuaram, em especial no ensino de Física. Teixeira, Greca e Freire

(2009) fizeram um estudo com o objetivo de realizar uma revisão sistemática e crítica das pesquisas publicadas em revistas de renome internacional que investigam o uso da HFC no ensino de Física. Esse estudo analisou 152 publicações, abrangendo o período de 1940 até 2008, e pode ser considerado, segundo os autores, um estado da arte sobre o tema. Um dos dados levantados é a distribuição das publicações ao longo das últimas décadas, que pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1: Distribuição das publicações.

| Década                | 1940 | 1950 | 1960 | 1970 | 1980 | 1990 | 2000 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Quantidade de Estudos | 1    | 1    | 5    | 11   | 26   | 49   | 59   |

Fonte: Teixeira, Greca e Freire (2009).

Pode-se observar uma tendência crescente de publicações ao longo das décadas nos principais periódicos internacionais. No Brasil, um estudo foi realizado por Queirós, Batisteti e Justina (2009), com o objetivo de mapear e discutir as investigações referentes à HFC presentes nos Encontros Nacionais de Pesquisa em Educação em Ciências (ENPEC), de 2001 até 2007, e nos Encontros de Pesquisa em Ensino de Física (EPEF), de 2000 até 2008, a fim de possibilitar uma reflexão acerca dessa temática de pesquisa. Dos 2973 trabalhos analisados, entre comunicações orais e pôsteres, foram encontrados 5,1% na área de HFC, e apresentando um aumento no decorrer dos anos. Com relação a esses estudos em HFC, foram encontrados 34% na área de formação de professores. No entanto, a maioria dessas pesquisas limitou-se a realizar levantamento das concepções sobre a natureza da ciência, a importância da HFC no ensino e a estrutura dos cursos de formação de professores. Ao final do estudo, os autores sugerem "o aumento de pesquisas com intervenção didática efetiva nos cursos de formação de professores e no ensino básico" (QUEIRÓS; BATISTETI; JUSTINA, 2009).

A mesma sugestão aparece no trabalho mais recente de Teixeira, Greca e Feire (2012), que realizaram uma revisão sistemática das pesquisas relacionadas ao uso de HFC no EC brasileiro. O objetivo dos autores foi o de elaborar um estado da arte sobre trabalhos de intervenção didática (empíricos), orientados por HFC, voltados ao ensino de Física. O período de pesquisa foi da década de oitenta até

2011, e abrangeu os principais periódicos nacionais. Inicialmente, encontraram 160 estudos que abordavam o uso didático de HFC em educação científica e observaram uma tendência crescente de trabalhos com essa temática, com clara predominância na área de Física. Os autores aplicaram sucessivos critérios de exclusão aos 160 artigos iniciais, e identificaram apenas 14 estudos (menos de 10%) que abordavam intervenções didáticas que faziam uso de HFC no EF. Esse fato “mostra uma relativa escassez das pesquisas de natureza empírica que são publicadas sobre intervenção em sala de aula de Física com uso de HFC” (TEIXEIRA; GRECA; FEIRE, 2012, p. 11). Os autores apontam também que há uma quantidade razoável de pesquisadores no Brasil trabalhando com a temática HFC, e que os trabalhos brasileiros possuem um rigor metodológico menor, em comparação com os trabalhos internacionais.

Um dado interessante do estudo de Teixeira, Greca e Feire (2012) é que a predominância desses 14 trabalhos de intervenção didática orientadas por HFC foi realizada no ensino superior (9 trabalhos). Considerando que a maior parte da população brasileira tem seu primeiro, e único, contato com a ciência na Educação Básica – a maioria sequer frequentará um curso superior - entende-se que esse dado aponta a necessidade de direcionar mais esforços para a pesquisa empírica com HFC na Educação Básica brasileira.

Nos últimos anos também tem sido publicada uma quantidade cada vez maior de livros em português dedicados à HFC, de autoria nacional ou traduzidos, tais como: Martins (1989), Biezunski (1993), Thuillier (1994), Brennan (1998), Rocha (2002), Martins (2002), Maxwell (2003), Braga, Guerra e Reis (2003), Benkirane (2004), Beltran e Goldfarb (2005), Braga, Guerra e Reis (2005), Martins (2007), Braga, Guerra e Reis (2007), Einstein e Infeld (2008), Braga, Guerra e Reis (2008), Araujo (2008), Capozzoli (2008), Martins (2008), Capozzoli (2009), Beltran *et al.* (2009), Takimoto (2009), Coelho (2011), Assis (2011), Pires (2011), Beltran, Saito e Trindade (2011), Gonsalves-Maia (2012), Rooney (2013), entre outros.

Com relação à crescente produção em HFC no Brasil, demonstrada nos trabalhos anteriormente citados, um estudo de Vilas-Boas *et al* (2013) relacionou as divergências quanto à inserção da HFC no EC, com o desenvolvimento da literatura recente. Para isso, realizou um levantamento bibliográfico em periódicos brasileiros entre o período de 1996 e 2010, abrangendo um *corpus* de 37 artigos.

O que o levantamento parece demonstrar é que a discussão sobre a inserção da História da Ciência foi encerrada, ficando em seu lugar a orientação geral de Matthews de que a história deve ser inserida. Porém [...] isto não se deu pela derrubada dos argumentos contrários à inserção [...] o que ocorreu foi efetivamente uma mudança de nível de discussão: doravante não se discutiria mais a inserção de História da Ciência; ao invés, a inserção é pressuposta e ocupa um papel fundamental (embora não o único papel) para a promoção da importância acerca da discussão sobre a Natureza da Ciência [...] fica a constatação de que: a literatura em ensino de ciências no Brasil, disponível nos periódicos, simplesmente, assume a pertinência da inserção de História da Ciência no ensino. Como tentamos argumentar, isto parece ser explicado pela mudança do foco de discussão: a importância conferida ao esclarecimento sobre a Natureza da Ciência fomentou a incorporação da História da Ciência como um dos elementos fundamentais deste esclarecimento (VILAS-BOAS *et al.*, 2013).

Mas é precipitado tomar essa discussão teórica como esgotada, como se só houvessem aspectos positivos no uso de HFC no EC. É a crescente quantidade de trabalhos em HFC, sobretudo de natureza empírica, que trarão novos elementos que subsidiarão a continuidade dos debates acerca da efetividade da inserção da HFC no EC. É nessa perspectiva que a presente dissertação de mestrado partilha do atual consenso teórico e propõe uma implementação das contribuições da HFC na formação inicial de professores e cientistas.

## 1.2 AS SETE VISÕES DEFORMADAS DA CIÊNCIA

Em um trabalho de doutorado sobre concepções de ciência, Fernández *et al.* (2000) realizaram workshops, entrevistas e discussões com numerosos grupos de professores na formação inicial e continuada, que foram articulados com uma revisão bibliográfica em periódicos internacionais, de artigos envolvendo educação científica e didática das



ciências, entre 1984 e 1998, totalizando 117 trabalhos analisados. Os resultados foram publicados em Fernández *et al.* (2002) e Gil-Perez *et al.* (2001), na Espanha e no Brasil, respectivamente. Nessa pesquisa, os autores identificaram sete visões deformadas sobre o trabalho científico, que:

são, quase geralmente, sempre as mesmas; mais ainda, não só se assinalam sistematicamente as mesmas deformações, como também se observa uma notável coincidência na frequência com que cada uma é mencionada (GIL-PEREZ *et al.*, 2001).

Esse resultado foi importante, pois mostra que as dificuldades em estabelecer concepções mais adequadas da ciência não se atêm apenas aos alunos da Educação Básica, mas na própria formação inicial, insuficiente, dos profissionais responsáveis pela educação científica. Portanto, é preciso voltar a atenção para a formação docente, pois “um professor de Ciências com conhecimento de HFC pode auxiliar os estudantes a compreender exatamente como a Ciência apreende, e não apreende, o mundo real, vívido e subjetivo” (MATTHEWS, 1995). Outros estudos, mais recentes, que também apontam a necessidade formativa do professor, são Marandino (2003), Brito, Neves e Martins (2004), Duarte (2004), Lederman (2006) e Hottecke (2010). O problema de fomentar imagens mais adequadas do empreendimento científico toma um contorno mais complexo, tornando-se uma área bastante ampla para investigações, havendo muito trabalho a ser feito.

A análise histórico-epistemológica do desenvolvimento do conceito de simultaneidade, realizada no capítulo seguinte desta dissertação de mestrado, foi feita buscando-se, principalmente, episódios históricos que sejam contra-exemplos das visões deformadas sobre o trabalho científico, levantadas por Gil-Perez *et al.* (2001). Elas foram identificadas estabelecendo-se, primeiramente, uma visão aceitável do trabalho científico, que não é uma simples “imagem correta”, mas sobretudo aquilo que deveria ser claramente evitado, num esforço consciente para desviar-se das maiores simplificações e deturpações. Para estabelecer essa visão aceitável, assumiram que

a referida imagem pode obter-se diretamente a partir da consideração do que têm em comum as

diversas perspectivas e teses epistemológicas de autores como Popper (1962), Khun (1971), Bunge (1976), Toulmin (1977), Lakatos (1982), Laudan (1984), Giere (1988). Para isso, procuramos os ditos pontos comuns – deixando de lado as inevitáveis interpretações, diferenças e mesmo divergências – com o objetivo de extrair algumas proposições básicas em torno da atividade científica. Sem negar o interesse das interpretações, diferenças e divergências, colocamos a tônica naquilo em que existe consenso, tendo como base uma visão da Ciência que não cai em demasiadas simplificações e deformações (GIL-PEREZ *et al.*, 2001).

É importante fazer uma ressalva: **as sete visões deformadas, apresentadas logo a seguir, não são um conjunto absoluto de características que se deve evitar associar à ciência.** Como se trata de um assunto filosófico polêmico, não há consenso. Deve-se entender que são visões indesejáveis com base nestes filósofos supracitados, sem a pretensão de dar o assunto por encerrado, esgotando outros posicionamentos contrários ou diferentes igualmente relevantes no debate filosófico.

As visões deformadas podem ser sucintamente caracterizadas da seguinte maneira:

- **Concepção empírico-indutivista e ateórica:** também conhecida como visão indutivista ingênua, é a concepção mais comum, onde segundo Gil-Perez *et al.* (2001) é referenciada em mais de 60 trabalhos. Ela é marcada pela ênfase na observação neutra, sem preconceitos, de fenômenos e experimentos, como ferramenta fundamental para o cientista fazer descobertas através da indução. Ela suprime o papel da heurística e do conhecimento existente como orientadores do processo. Outro fato interessante é que apesar de ser a concepção mais comum, foi pouco citada por professores no estudo de Gil-Perez *et al.* (2001). Segundo os autores, a ausência da autopercepção dessa visão deformada pode indicar que ela está bastante enraizada entre professores.
- **Concepção algorítmica, exata, infalível:** essa visão costuma

enfocar o uso de um método único para a produção da ciência, composto de etapas bem definidas, que caracteriza o método científico. Amplamente difundida entre professores, verificadas em 40 estudos, costuma complementar a visão empírico indutivista, suprime o caráter criativo, inventivo e intuitivo da investigação científica. É geralmente evocada a fim de legitimar o conhecimento científico como infalível, pois advém de um método rigoroso, quantitativo e confiável.

- **Concepção apromática e ahistórica:** nessa visão o conhecimento científico aparece desconectado dos problemas que lhe deram origem. Dessa forma o conhecimento adquire caráter dogmático, fechado, e que, segundo Gil-Perez *et al.* (2001), o EC reforça por omissão. Tal perspectiva encobre que “para o espírito científico, todo conhecimento é resposta a uma pergunta. Se não há pergunta, não pode haver conhecimento científico. Nada é evidente. Nada é gratuito. Tudo é construído” (BACHELARD, 1986, p.18). Omitir os problemas sacrifica uma compreensão mais profunda de como a ciência apreende a realidade em troca de uma legitimação através da “evidência incontestável das coisas naturais” (CHEVALLARD, 1991). Segundo Gil-Perez *et al.* (2001) mais de 35 trabalhos se referem à essa concepção, que apareceu frequentemente em discussões com professores de ciência. O filósofo Larry Laudan propõe que “a Ciência é essencialmente uma atividade de resolução de problemas” (LAUDAN, 2011, p. 17). Para ele, os problemas podem ser empíricos ou conceituais. Problemas empíricos são, de modo geral, “qualquer coisa presente no mundo natural que pareça estranha ou que, de alguma forma, necessite de explicação” (LAUDAN, 2011, p. 22). Já os problemas conceituais envolvem as estruturas criadas para a resolução dos problemas empíricos (teorias), e podem ser internos ou externos. Os problemas conceituais internos são contradições (internas) encontradas em uma teoria. Já os problemas conceituais externos são contradições encontradas entre teorias diferentes. O propósito desta breve explicação, mesmo que muito sucinta, ficará evidenciado no próximo capítulo dessa dissertação, quando vários desses problemas surgirão no desenvolvimento histórico do conceito de simultaneidade.
- **Concepção exclusivamente analítica:** induz à ideia de uma

ciência cada vez mais especializada, ignorando os esforços pela unificação e coerência global entre teorias, que resulta em corpos amplos de conhecimento. Segundo Gil-Perez *et al.* (2001), poucos trabalhos a referenciam, no entanto, o estudo de Fernández (2000, p. 179-204) aponta que mais de 80% dos professores e livros-textos carregam implicitamente essa visão.

- **Concepção acumulativa de crescimento linear:** concebe a evolução do conhecimento como uma acumulação contínua, feita de forma linear, onde o papel do cientista é adicionar, resultando numa quantidade cada vez maior de leis. Essa visão ignora crises, rupturas e remodelações profundas, que resultam em um conhecimento novo. Segundo Gil-Perez *et al.* (2001), é uma interpretação simplista da evolução do conhecimento científico.
- **Concepção individualista e elitista:** apresenta uma ciência feita somente por pessoas muito dotadas intelectualmente, onde o cientista trabalha sozinho e produz através de *insights*, ou lampejos de genialidade. Essa visão ignora o intenso trabalho coletivo e cooperativo entre cientistas. Transmite a ideia de que a ciência é um domínio para poucos, o que cria expectativas negativas e pode prejudicar a aprendizagem. Segundo Gil-Perez *et al.* (2001), uma dessas expectativas negativas pode ser a de gênero, apresentando a ciência como uma atividade essencialmente masculina.
- **Concepção socialmente neutra:** nessa visão a ciência é vista como uma atividade independente de valores sociais, ou seja, de valores econômicos, políticos, culturais, religiosos, ideológicos, tecnológicos... Sendo assim, ela seria socialmente imparcial, e cientistas não fariam escolhas morais em seu trabalho. Nesta visão ignoram-se as relações entre ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS). A esfera científica, apesar de autônoma em relação à produção do conhecimento, influencia e é influenciada por outras esferas da sociedade.

Segundo Fernández *et al.* (2005), as visões deformadas apresentadas não são mutuamente exclusivas, constituindo sete “pecados capitais”, pelo contrário, são complementares. A concepção empirista e ateuórica, induzida principalmente por um ensino livresco e por uma experimentação feita à partir de “receitas de bolo” (roteiros rígidos),

reforça a visão algorítmica e às relações simplistas entre Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS). Já a visão aproblemática e ateórica, por omitir o contexto histórico-social do desenvolvimento de um conhecimento, reforça também relações simplistas entre CTS. A visão acumulativa linear é complementar à algorítmica e rígida. Enquanto uma é uma simplificação de uma investigação científica em particular, a outra é uma simplificação da evolução dos conhecimentos ao longo do tempo. A visão individualista e elitista, por omitir o caráter coletivo e colaborativo da ciência, apoia implicitamente a ideia de “descobrimento” e reforça a visão socialmente neutra e descontextualizada (aproblemática e ateórica). Essas sete visões aparecem associadas entre si, formando uma imagem ingênua da ciência, sendo socialmente aceita.

As sete visões deformadas elencadas por Gil-Perez *et al.* (2001), apresentadas anteriormente, não esgotam as possibilidades de categorizar concepções inadequadas da ciência. Mas tendo em vista que elas traduzem um relativo consenso entre as concepções de diversos filósofos do século 20 e que a sua presença entre alunos e professores é um fato que não se limita a amostra do estudo espanhol, considera-se que essas visões constituem categorias de análise epistemológica adequadas para fundamentar as discussões da presente pesquisa.

A partir de uma revisão bibliográfica realizada no período de 2001 a 2013, que inclui os dois principais periódicos da educação científica da Espanha, o país originário da pesquisa de Gil-Perez *et al.* (2001) e os periódicos de maior expressão dessa área no Brasil (Tabela 2), encontrou-se 27 artigos que utilizam, discutem ou se fundamentam nessas visões deformadas do trabalho científico.

Tabela 2: Relação dos periódicos pesquisados.

| <b>Origem</b> | <b>Periódico</b>                                       | <b>Quant.</b> | <b>Freq. (%)</b> |
|---------------|--|---------------|------------------|
| Brasil        | Ciência e Educação                                     | 4             | 14,81            |
| Brasil        | Caderno Brasileiro de Ensino de Física                 | 4             | 14,81            |
| Espanha       | Revista Eletrónica de Enseñanza de las Ciencias        | 5             | 18,52            |
| Espanha       | Enseñanza de las Ciencias                              | 3             | 11,11            |
| Brasil        | Investigações em Ensino de Ciências                    | 2             | 7,41             |
| Brasil        | Revista Brasileira de Ensino de Física                 | 4             | 14,81            |
| Brasil        | Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências | 2             | 7,41             |
| Brasil        | Experiências em Ensino de Ciências                     | 2             | 7,41             |
| Brasil        | Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências                | 1             | 3,70             |
| Brasil        | Alexandria   | 0             | 0,0              |
| Brasil        | Ciência e Ensino                                       | 0             | 0,0              |
| <b>Total</b>  |  | <b>27</b>     | <b>100</b>       |

Fonte: elaborada pelo autor.

Os trabalhos selecionados foram divididos em cinco categorias, conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Categorização dos trabalhos encontrados

| <b>Categorias</b>          | <b>Descrição</b>  | <b>Referências</b>  |
|----------------------------|---|---|
| <b>Análise de Material</b> | Analisam diversos tipos de materiais, didáticos ou não.                                 | Cordeiro e Peduzzi (2013), Tomazi et al (2009), Mesquita e Soares (2008)  |
| <b>Diagnóstico</b>         | Realizam levantamento de concepções epistemológicas e/ou analisam cursos ou currículos. | Oleques, Boer e Bartholomei-Santos (2013), Hygino, Souza e Linhares (2013), Hygino, Souza e Linhares (2012), Lima e Núñez (2011), Tobaldini et al (2011), Rezende, Ferreira e Queiroz (2010), Marin e Benarrochi (2009), Teixeira, Freire e El-Hani (2009), Vilela-Ribeiro e Benite (2009), Marin e Benarrochi (2009), Oki e Moradillo (2008), Rosa e Martins (2007), El-Hani, Tavares e Rocha (2004) |
| <b>Estudos Históricos</b>  | Realizam investigações sobre o desenvolvimento histórico de algum tema.                 | Silva, Forato e Gomes (2013), Aurino da Silva e Peduzzi (2012), Cordeiro e Peduzzi (2011), Cordeiro e Peduzzi (2010), Teixeira, Peduzzi e Freire (2010), Delizoicov, Carneiro e Delizoicov (2004)   |

|                             |   |   |
|-----------------------------|---|---|
| <b>Intervenção Didática</b> | Propõem, discutem, sugerem ou relatam o ensino de História e Filosofia da Ciência ou de abordagens historicamente contextualizadas. | Oleques, Boer e Bartholomei-Santos (2013), Hygino, Souza e Linhares (2013), Hygino, Souza e Linhares (2012), Briccia e Carvalho (2011), Forato, Pietrocola e Martins (2011), Tobaldini et al (2011), Cordeiro e Peduzzi (2010), Rezende, Ferreira e Queiroz (2010), Silveira et al (2010), Teixeira, Freire e El-Hani (2009), Praxedes e Peduzzi (2009), Vilela-Ribeiro e Benite (2009), Oki e Moradillo (2008), El-Hani, Tavares e Rocha (2004). |
| <b>Discussão Filosófica</b> | Realizam discussões filosóficas acerca da Natureza da Ciência   | Chamizo-Guerreiro(2007).  |

Fonte: elaborada pelo autor.

É importante salientar que alguns trabalhos estão em mais de uma categoria, por constituírem estudos mais amplos. Os artigos constantes na Tabela 3 são apresentados resumidamente, por ano de publicação, na Tabela 4:

Tabela 4: Resumo dos trabalhos.

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Cordeiro e Peduzzi (2013) | Analisa a Transposição Didática do tema Radioatividade, em um livro usado em disciplinas de estrutura da matéria, na formação inicial de cientistas e professores. |
|---------------------------|--|



|   |  |
|---|--|
|   | <p>Relacionam a descontextualização, dessincronização e a despersonalização encontradas, com as sete visões deformadas da ciência. Discutem o que se ganha, e o que se perde, com o atual ensino descontextualizado historicamente, em favor da publicidade e da organização lógica do conhecimento. Visando a melhoria na formação universitária, a curto prazo, recomendam a inserção direta pelos professores, de tópicos de História e Filosofia da Ciência em suas aulas.</p>   |
| Oleques, Boer e Bartholomei-Santos (2013) | <p>Levantam as concepções sobre ciência, e sua relação com a religião, de 99 alunos do curso de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Consideram, como categoria de análise, as visões deformadas da ciência. Utilizam a metodologia do discurso do sujeito coletivo para analisar os dados coletados. Identificam que, aproximadamente 50% dos alunos possuem a visão empírica-indutivista, e que 80% dos estudantes percebem ciência e religião como corpos de conhecimento distintos. Sugerem a inclusão de disciplinas de História e Filosofia da Ciência nos currículos dos cursos de formação de professores.</p> |
| Hygino, Souza e Linhares (2013)           | <p>Elaboram uma proposta de ensino da História da Ciência, abordando como tema as observações do astrônomo jesuíta Valentin Stansel, feitas no Brasil, no século XVII. Aplicam essa proposta em uma turma de Ensino de Jovens e Adultos, utilizando ambientes virtuais de aprendizagem. Consideram as sete visões deformadas da ciência para fundamentar discussões epistemológicas acerca do tema. Investigam, por meio de pesquisa qualitativa, a aplicação da proposta. Concluem que o uso da História da ciência permitiu que os alunos pudessem refletir sobre o processo de construção do</p>  |

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
|                                  | conhecimento científico, além de promover o enriquecimento cultural.  |
| Silva, Forato e Gomes (2013)     | Exploram alguns episódios do desenvolvimento do conceito de calor, da Antiguidade até o século XVIII, com o intuito de discutir aspectos epistemológicos e sociológicos da construção do conhecimento científico referente a este conceito. Na análise histórica, buscaram, principalmente, contra-exemplos das sete visões deformadas da ciência.  |
| Aurino da Silva e Peduzzi (2012) | Analisam o contexto histórico do desenvolvimento da física newtoniana, elencando vários episódios históricos, relacionando-os às sete visões deformadas da ciência. Constroem um contraponto substancial a essas visões, fornecendo subsídios para futuros trabalhos de intervenção didática sobre a natureza da ciência.   |
| Hygino, Souza e Linhares (2012)  | Elaboram e aplicam uma proposta de ensino de História da Ciência, abordando a expedição de Couplet ao Brasil, em 1698, que pretendia contribuir para resolver a controvérsia sobre o formato da Terra. Utilizam a metodologia da pesquisa ação, em uma classe de Ensino de Jovens e Adultos (PROEJA), usando um ambiente virtual de aprendizagem. Buscam promover discussões sobre a importância da expedição para o debate sobre o formato da Terra. Identificam visões sobre a natureza da ciência entre os alunos, e relacionam com as sete visões deformadas da ciência de Gil-Perez. Encontram principalmente as visões socialmente neutra e acumulativa/linear do conhecimento. Relatam que as reflexões e discussões dos alunos sobre esse episódio histórico permitiram um aprofundamento do entendimento da natureza da ciência. |
| Briccia e                        | Relatam uma intervenção didática que abordou a natureza do calor através de textos  |

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| Carvalho<br>(2011)                  | históricos. Problematicam questões sobre a Natureza da Ciência através de discussões com os alunos. Investigam essas discussões analisando as interações orais e escritas em sala de aula. Apontam o aparecimento de 3 características consensuais sobre a ciência: a ciência como atividade humana, o caráter provisório do conhecimento científico e a visão histórica e problemática da ciência. Concluem que no uso de uma abordagem historicamente contextualizada os alunos reconhecem algumas características do trabalho científico.  |
| Cordeiro e Peduzzi (2011)           | Realizam um estudo histórico sobre a origem e desenvolvimento da radioatividade, no período de 1899 até 1913. Enfatizam características do trabalho científico que podem ser discutidas, como a recusa a um único método científico, a indução ingênua dos dados experimentais puros e a investigação do pensamento divergente, a busca pela coerência global e a compreensão do caráter social do trabalho científico. Apontam a riqueza histórica e as possibilidades para discussões sobre a Natureza da Ciência.  |
| Forato, Pietroccla e Martins (2011) | Discutem os desafios para implementação de propostas de ensino historicamente contextualizadas. Elencam as recomendações da literatura para o uso da HFC, como aproximar o professor de historiadores da ciência e evitar o anacronismo (whiggismo, hagiografia, anedotas históricas, reconstrução linear). Analisam e confrontam os aspectos historiográficos com os aspectos didáticos na construção do saber escolar, como: seleção de conteúdo, tempo didático, simplificação e omissão, relativismo, inadequação de trabalhos especializados e falta de formação docente específica. Enfatizam alguns dilemas na construção de uma proposta de ensino historicamente |

|                                |   |
|--------------------------------|---|
|                                | contextualizada, como: extensão versus profundidade, simplificação versus distorção, compreensibilidade versus rigor histórico, objetivismo versus subjetivismo. Partindo dessa análise, elaboram e aplicam uma proposta envolvendo a história da óptica, onde alguns obstáculos apontados foram superáveis e outros apenas contornados.  |
| Lima e Núñez (2011)            | Levantam as concepções de ciência de 13 estudantes de Licenciatura em Química, em fase final do curso, através de questionários, discussões e entrevistas individuais. Investigam principalmente concepções sobre a Natureza da Ciência, modelos científicos e modelos didáticos. Identificam diversas concepções de ciência e relacionam com a literatura. Relatam que todos os participantes apontam o conhecimento científico construído através de um método. Relacionam esse fato com a visão deformada rígida (algorítmica, exata, infalível) da ciência. Sugerem a incorporação de discussões mais profundas acerca dos aspectos investigados no estudo, durante a formação inicial de professores de Química. |
| Tobaldini <i>et al.</i> (2011) | Levantam as concepções de ciência de professores universitários e estudantes de biologia. Identificam, inicialmente, concepções simplistas sobre a ciência e as relacionam com a literatura sobre o tema. Promovem discussões semanais, durante o ano de 2009, analisando o processo de construção conceitual da natureza do conhecimento científico. Percebem mudanças significativas na concepção de ciência dos participantes da pesquisa. Apontam a dificuldade de discutir a ciência sob uma perspectiva histórica.  |
| Cordeiro e                     | Discutem a gênese da radioatividade e algumas implicações para a educação   |

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Peduzzi (2010)                     | científica. Traduzem as duas Conferências Nobel, de Pierre Curie (1905) e Marie Curie (1911), sobre a radioatividade. Discutem as implicações educacionais, nos aspectos motivacionais, histórico-epistemológicas e conceituais. Abordam o <i>glamour</i> do prêmio Nobel e a história de superação do casal Curie, exploram os diálogos das conferências e as visões inadequadas da ciência discutidas na literatura e a origem da energia nos fenômenos radioativos. Discutem questões de gênero ligadas ao prêmio Nobel. Apontam a importância dos estudos da radioatividade para o desenvolvimento da Física Nuclear. |
| Rezende, Ferreira e Queiroz (2010) | Produzem um guia de estudos sobre a história e desenvolvimento da química estrutural, visando fomentar discussões a respeito da construção do conhecimento científico. Aplicam esse guia em 48 alunos de um curso de Química, durante um curso extra curricular de 6 horas. Solicitaram, ao final, a produção de um texto. Analisam epistemologicamente os textos, relacionando-os com a literatura sobre o tema. Destacam a boa qualidade dos textos e que a experiência favoreceu o entendimento de algumas características essenciais do trabalho científico.  |
| Silveira <i>et al.</i> (2010)      | Elaboram e aplicam uma sequência didática historicamente contextualizada sobre o movimento relativo, no curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba (UEP). Confrontam as idéias de Aristóteles e Galileu utilizando atividades de leitura, elaboração de cartazes e encenações. Discutem aspectos sobre a natureza da ciência, como: relação entre evidência experimental e elaboração de teorias, leis e teorias científica mutáveis, ciência inserida num contexto social, construção coletiva do   |

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
|                                   | conhecimento científico e recusa de um método científico único. Descrevem e avaliam a aplicação da sequência didática. Apontam satisfação entre os participantes da pesquisa.  |
| Teixeira, Peduzzi e Feire (2010)  | Realizam uma revisão do debate historiográfico entre Cohen e Westfall sobre a origem e desenvolvimento da Gravitação Universal. Apontam concordâncias e discordâncias entre os dois historiadores. Discutem as possíveis contribuições que esse debate poderia ter no ensino da gravitação universal historicamente contextualizada, como fomentar discussões sobre a Natureza da Ciência e desenvolver a capacidade argumentativa dos alunos.                 |
| Marin e Benarrochi (2010)         | Desenvolvem um questionário sobre a Natureza da Ciência que possui um mecanismo de feedback para melhorar a adequação das perguntas. Aplicam em duas oportunidades esse questionário, no mesmo grupo de alunos, a fim de verificar a evolução das concepções epistemológicas destes. Analisam os resultados e concluem que houve mudança estatisticamente significativa.   |
| Teixeira, Freire e El-Hani (2009) | Utilizam uma abordagem historicamente contextualizada em uma disciplina de mecânica clássica do curso de Física da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). Analisam qualitativamente a evolução das concepções sobre a Natureza da Ciência dos alunos através de entrevistas semiestruturadas e um pré e pós teste. Apontam uma melhoria significativa das concepções e associam à abordagem historicamente contextualizada realizada na disciplina. |

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Tomazi <i>et al.</i> (2009)    | <p>Analisam e caracterizam as imagens de ciência veiculadas em 9 filmes de animação infantil, selecionadas através de palavras-chave em suas sinopses. Utilizam um roteiro de observação e identificam as concepções de ciência veiculadas no material analisado. Relacionam essas concepções com a literatura sobre o tema. Discutem aspectos dos personagens, como sexo, idade, etnia, características psicológicas, local de trabalho, instrumentos utilizados etc. Constatam que, no geral, a ciência é vista como uma atividade orientada para o bem comum, com produção de conhecimento imediato, com poucos erros e com êxito no fim. Sugerem que os filmes de animação possuem potencialidades educativas, no entanto, mencionam que o seu uso deve ser acompanhado de uma discussão reflexiva.</p> |
| Praxedes e Peduzzi (2009)      | <p>Refletem sobre o potencial educativo de dois artigos, intitulados “Entrevista com Tycho Brahe” e “Entrevista com Kepler – do seu nascimento à descoberta das duas primeiras leis”. Identificam questões de natureza epistemológica nos artigos e relacionam com as contribuições da HFC contemporânea. Discutem o potencial educativo dos artigos e sugerem uma estratégia geral para o uso dos artigos em sala de aula. Enfatizam a potencialidade desse episódio histórico em desconstruir, particularmente, a imagem socialmente neutra da ciência.</p>   |
| Vilela-Ribeiro e Benite (2009) | <p>Promovem uma discussão epistemológica entre professores que participam das reuniões do Núcleo de Pesquisa em Ensino de Ciências (NUPEC) do Instituto de Química da Universidade Federal de Goiás (UFG). Analisam as concepções de ciência utilizando análise do discurso, relacionando com a literatura sobre o tema. Identificam diversas</p>   |

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
|                         |   | visões inadequadas sobre a Natureza da Ciência, predominantemente empírico indutivistas. Relatam resistência dos participantes em expressar claramente suas concepções sobre a Natureza da Ciência.  |
| Marin Benarrochi (2009) | e | Realizam uma revisão sobre os principais questionários utilizados para levantar as concepções sobre a Natureza da ciência. Desenvolvem um questionário com a mesma finalidade, mas que possui um mecanismo de feedback para melhorar a adequação das perguntas. Usam esse questionário em duas oportunidades. Concluem que, após sucessivas aplicações, o questionário tornou-se estável e permitiu caracterizar adequadamente as visões dos estudantes.                                   |
| Mesquita Soares (2008)  | e | Analisa os seriados de animação infantil Jimmy Nêutron e O Laboratório de Dexter. Caracterizam o cientista e suas ações, identificando as visões de ciência veiculadas utilizando a análise documental. Relacionam essas visões com a literatura e discutem como esses personagens podem influenciar os telespectadores e fomentar visões deformadas da ciência. Sugerem ao professor o uso desse tipo de material como um elemento novo para discutir a ciência.                          |
| Oki e Moradillo (2008)  |   | Relatam um estudo de caso na disciplina de História da Química, do curso de Licenciatura em Química da Universidade Federal da Bahia (UFBA). Levantam as concepções epistemológicas prévias dos alunos através de questões problematizadoras sobre diversos temas. Trabalham os temas através de textos previamente selecionados, realizando nova discussão em momento posterior. Analisam qualitativamente a evolução das concepções epistemológicas, utilizando entrevistas, registros e |



|  |  |
|--|--|
|  | observações em sala de aula. Apontam o aparecimento de concepções mais elaboradas ao final da disciplina, ressaltando a importância desse tipo de discussão para a formação de professores.  |
| Rosa e Martins (2007)                    | Investigam a inserção de conteúdos relativos à HFC nos cursos de Licenciatura e Bacharelado em Física da UFBA. Analisam a estrutura curricular dos cursos e as concepções dos professores do Instituto de Física sobre a pertinência da HFC na formação de físicos. Utilizam um roteiro e entrevistas padronizadas de final aberto. Apontam boa receptividade dos professores com relação à HFC e perspectivas de ampliação da inserção de HFC no curso de licenciatura.   |
| Chamizo-Guerreiro (2007)                 | Apresentam as principais contribuições de Toulmin à Filosofia da Ciência, desde o contexto de surgimento de suas primeiras obras. Relacionam o pensamento de Toulmin com outros filósofos, como Kuhn, Lakatos e Laudan. Discutem a pouca aceitação das idéias de Toulmin. Relacionam o pensamento de Toulmin com o ensino de Ciências.   |
| Delizoicov, Carneiro e Delizoicov (2004) | Realizam um estudo histórico e epistemológico das concepções de movimento do sangue no corpo humano, a partir dos trabalhos de Galeno e Harvey, utilizando como referencial epistemológico Ludwick Fleck. Problematicam alguns aspectos sobre a Natureza da Ciência, em especial a concepção empirista e atórica, de crescimento linear do conhecimento científico, a concepção individualista e a imagem neutra e socialmente descontextualizada da ciência. Enfatizam a necessidade de produzir bibliografia para uma inserção adequada de aspectos histórico-filosóficos nas aulas de biologia. |

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| El-Hani,<br>Tavares e<br>Rocha (2004) | Testam uma proposta de ensino de HFC em uma disciplina do curso de Bacharelado em Ciências Biológicas, da Universidade Federal da Bahia (UFBA). Levantam as concepções de ciência dos alunos através de um pré e pós teste, utilizando questionário. Analisam de maneira quali-quantitativamente a evolução das concepções sobre a ciência dos alunos. Apontam, em termos globais, um aumento significativo de visões adequadas de ciência, em comparação com os resultados do pré-teste. Enfatizam uma mudança principalmente na demarcação entre conhecimento científico e outras formas de conhecimento e as diferenças entre lei e teoria. |
|---------------------------------------|--|

Fonte: elaborada pelo autor.

Os trabalhos que mencionam e utilizam o estudo de Gil-Perez *et al.* (2001) mostram a preocupação dos autores em fomentar uma imagem não deformada do trabalho científico, evitando demasiadas simplificações e deformações. Este fato parece justificar, inequivocamente, a importância do tema e o uso destas concepções como referência para uma análise histórico-epistemológica do conceito de simultaneidade. Analisando a Tabela 3, percebe-se que a maioria dos trabalhos foca-se em diagnósticos e intervenções didáticas. Muitos fazem ambos, pois se dedicam a analisar a evolução de certas concepções epistemológicas a partir de alguma intervenção didática, como os trabalhos de Oleques, Boer e Bartholomei-Santos (2013), Hygino, Souza e Linhares (2013), Hygino, Souza e Linhares (2012), Briccia e Carvalho (2011), Lima e Núñez (2011), Tobaldini *et al.* (2011), Rezende, Ferreira e Queiroz (2010), Teixeira, Freire e El-Hani (2009), Vilela-Ribeiro e Benite (2009), Oki e Moradillo (2008) e El-Hani, Tavares e Rocha (2004). No entanto, existem poucas pesquisas que realizam estudos históricos, necessários para subsidiar discussões histórico-filosóficas acerca dessas deformações.

Por último, é importantíssimo salientar que uma boa formação inicial de professores não é requisito suficiente para que se incorpore a HFC no EC de forma adequada. García-Carmona, Vásquez e Manassero (2011) argumentam que existem outros obstáculos para o ensino de HFC, e que os cursos de formação de professores devem se debruçar sobre eles. Os obstáculos são:

- A falta de consenso entre as escolas sobre o que deve constituir uma adequada alfabetização científica e, consequentemente, que muitas escolas excluem por princípio a Natureza da Ciência.
- A confusão de identificar a Natureza da Ciência com uma capacidade associada com os procedimentos científicos, que não necessita de conteúdos curriculares interdisciplinares próprios e diferenciados. Embora muitos professores possuam um adequado

conhecimento sobre a Natureza da Ciência, e os currículos explicitem a inclusão de tal conteúdo, não significa que seus aspectos sejam abordados nas aulas.

- O ensino da Ciência se identifica essencialmente com a aprendizagem de conteúdos declarativos (fatos, conceitos e princípios) e toda inovação didática, como a inclusão da Natureza da Ciência, representa uma carga adicional difícil de assumir. Muitos professores sentem que sua tarefa mais importante, de longe, é ensinar princípios da ciência e todo o tempo disponível é insuficiente para isso.
- A educação científica, como reflexo da objetividade atribuída à ciência, deve estar livre de valores e outros elementos subjetivos contrários a objetividade. Muitos professores assumem a ideia de que a ciência rechaça tudo o que não se ajusta a um suposto padrão objetivo.
- As ideologias pessoais dos professores interferem também em suas visões acerca da Natureza da Ciência. Em educação ambiental, se observa que a ideologia ambiental mais frequente dos professores em formação é a denominada desenvolvimental-protecionista, componente que condiciona a orientação didática e os assuntos dos conteúdos (GARCÍA-CARMONA, VÁSQUEZ, MANASSERO, 2011, tradução nossa).

Considerando, então:

- O reconhecimento do potencial da HFC no EC, levando a uma

reaproximação a partir dos anos 80;

- O crescente número de trabalhos que defendem a inserção da HFC no EC, tanto em nível nacional quanto internacional;
- A crescente publicação de materiais históricos, em língua portuguesa;
- O recorrente número de trabalhos em HFC dedicados ao levantamento de concepções epistemológicas dos estudantes e a necessidade de mais pesquisas de intervenção didática;
- A prevalência dessas visões deformadas,

esse trabalho de mestrado pretende constituir-se em uma contribuição relevante à formação de professores e cientistas, tanto para o fomento de visões mais adequadas de ciência (intervenção didática) quanto para ofertar subsídios históricos que possibilitem uma melhor compreensão do conceito de simultaneidade, no âmbito da Física.



## 2 A EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE SIMULTANEIDADE: SUBSÍDIOS PARA DISCUSSÕES CONCEITUAIS E EPISTEMOLÓGICAS

O livro *Concepts of Simultaneity*, do físico e historiador da ciência Max Jammer (JAMMER, 2006), apresenta o desenvolvimento histórico do conceito de simultaneidade, desde a filosofia grega e medieval, passando por toda a Física Clássica, Relatividade Restrita e Relatividade Geral, até a Mecânica Quântica. Esse conteúdo compreende 15 capítulos, dispostos em 338 páginas. Reconhecido pelos seus trabalhos, Jammer investigou historicamente outros conceitos fundamentais da Física, apresentando o produto de suas pesquisas nas obras:

- *Concepts of Space: The History of Theories of Space in Physics* (JAMMER, 1954);
- *Concepts of Force: A Study in the Foundations of Dynamics* (JAMMER, 1957);
- *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics* (JAMMER, 1961);
- *Concepts of Mass in Contemporary Physics and Philosophy* (JAMMER, 2000).

Os sete primeiros capítulos do *Concepts of Simultaneity*, descritos brevemente a seguir, e em pormenores nas próximas seções, relevantes para os objetivos do presente trabalho de mestrado, são utilizados como referência principal da pesquisa histórica realizada neste capítulo. Essa pesquisa buscou subsídios para realizar discussões conceituais e epistemológicas sobre o conceito de simultaneidade no período que vai da Grécia antiga à relatividade einsteiniana. Esse estudo será orientado pela procura de respostas as seguintes questões:

- Que aspectos conceituais do desenvolvimento do conceito de simultaneidade podem contribuir para uma ressignificação do mesmo, no ensino da Física, com base no conceito de aprendizagem significativa da teoria da Aprendizagem de David Ausubel (AUSUBEL, 2003)?
- Que aspectos históricos do desenvolvimento do conceito de simultaneidade podem ser úteis para contra-exemplificar as

visões deformadas do trabalho científico elencadas por Gil-Perez *et al.* (2001)?

O primeiro capítulo, intitulado **Preliminares Terminológicas**, explicita o significado de vários termos, tais como: evento, sincronismo, isocronismo, não-localidade, contemporaneidade e outros. Apresenta também discussões sobre a origem etimológica de alguns desses termos. Não apresenta episódios históricos.

O segundo capítulo, **O Conceito de Simultaneidade na Antiguidade**, aborda a noção da simultaneidade na Antiguidade, em especial na Grécia, desde os pré-socráticos como Parmênides (515- ?? a.C.) até Sexto Empírico (160-210 d.C.). Diversos assuntos são discutidos, por exemplo: a medição da circunferência da Terra feita por Eratóstenes, a refutação da Astrologia por Sexto Empírico, os quatro paradoxos de Zenão, a concepção de tempo de Parmênides e Aristóteles, a definição de simultaneidade de Aristóteles e a sua tese da simultaneidade visual.

O terceiro capítulo, **Conceitos Medievais de Simultaneidade**, investiga o uso da simultaneidade entre os escolásticos medievais e pensadores árabes. Diversos assuntos são abordados, tais como: a refutação da Astrologia por Santo Agostinho, a definição de eternidade divina por Anicius Boethius, e uma discussão profunda sobre a essência e a existência do tempo, feitas por Alexandre de Afrodísia, Avicena, Averroes e William Ockham.

O quarto capítulo, **O Conceito de Simultaneidade nos séculos XVI e XVII**, discute o abandono da noção de tempo associada ao movimento, através dos trabalhos de Bernardino Telesio e Francesco Patrizi, Pierre Gassendi e outros filósofos; o desenvolvimento dos relógios mecânicos de precisão, suscitado pela necessidade da navegação comercial em determinar a longitude em alto mar; a medição da velocidade da luz feita por Olaf Roemer e o cálculo das distâncias interplanetárias feito por Cassini.

O quinto capítulo, **O Conceito de Simultaneidade na Física Clássica**, aborda o desenvolvimento do conceito de tempo e simultaneidade dentro da Física Clássica, que começou com a formulação da mecânica de Newton. São apresentadas as mais variadas críticas ao tempo absoluto, feitas por físicos e filósofos importantes, como Locke, Leibniz, Berkeley e Kant.

O sexto capítulo, **A Transição para o Conceito Relativista de Simultaneidade**, discute as concepções de tempo e simultaneidade de



Mach e Poincaré, que influenciaram decisivamente a formulação do conceito einsteniano de simultaneidade.

O sétimo capítulo, **Simultaneidade na Teoria da Relatividade Especial**, explora o contexto da formulação da relatividade, apresenta e discute diversas definições formuladas por Einstein em 1905, 1907, 1910, 1911, 1914, 1915, 1917 e 1921. Aborda algumas críticas à relatividade, tais como erros de tradução, e apresenta brevemente a tese da convencionalidade.

## 2.1 O CONCEITO DE SIMULTANEIDADE NA ANTIGUIDADE

O primeiro episódio histórico relevante, apresentado no segundo capítulo do livro de Jammer, é o método de determinação da circunferência da Terra por Eratóstenes (276-194 a.C.).

O método de Eratóstenes consistia em realizar simultaneamente duas observações: em Meroe (Alexandria) uma pessoa deveria medir o comprimento da sombra do obelisco local precisamente no momento em que o fundo de um poço profundo em Siena (Assuan) estivesse completamente iluminado pelos raios do sol. Os dois lugares, supostamente encontravam-se no mesmo meridiano (JAMMER, 2006, p. 19, tradução nossa).

Esse método também pressupõe que Siena esteja aproximadamente no Trópico de Câncer e o conhecimento da distância entre as duas cidades, para então ser possível calcular a circunferência da Terra. No entanto, na execução do método por Eratóstenes, não há registro de que tenha havido duas observações simultâneas. Sendo Eratóstenes nativo de Siena, ele sabia que nessa cidade, no meio dia solar do solstício de verão, o sol estava no zênite, iluminando o fundo de um poço. Bastava conhecer o dia do solstício, através de uma contagem pelo calendário, e realizar a medição da sombra do obelisco durante o meio dia solar, em Alexandria. Como as duas cidades estão aproximadamente no mesmo meridiano, o meio dia solar para ambas é **simultâneo**. Assim, Eratóstenes utilizou o sol como um relógio para sincronizar dois eventos distantes, fazendo um notável uso da noção de simultaneidade não-local.

Outro episódio astronômico apresentado por Jammer é a argumentação contra a Astrologia, feita por Sexto Empírico (160-210 d.C.). Para a determinação do signo ascendente, Sexto Empírico descreve como os caldeus procediam. Enquanto uma mulher estava em trabalho de parto, um caldeu se posicionava no alto de uma montanha, observando o céu. Assim que o bebê nascia, imediatamente o caldeu no alto da montanha era comunicado através do som de um gongo. Quando o sinal era percebido, o caldeu verificava qual constelação estava nascendo, no leste, determinando o signo ascendente.

Segundo Jammer (2006, p. 20), Sexto Empírico demonstrou que o som do gongo necessita de um certo tempo para alcançar o topo da montanha, embora não soubesse sua velocidade, que só foi medida pela primeira vez em 1630, por Marin Mersenne. Sexto Empírico foi o primeiro que criticou o método de transmissão de sinal, utilizado pelos caldeus, para estabelecer a simultaneidade não-local. Aos olhos da Física Clássica, um sinal sonoro poderia ser utilizado para determinar a simultaneidade não-local, mas para isso seria necessário conhecer a velocidade do som, do vento, a distância envolvida, e efetuar os cálculos necessários para descontar a diferença.

Outro episódio muito importante na Antiguidade foram os quatro Paradoxos de Zenão, pois eles “formaram os degraus para todas as teorias sobre espaço e tempo infinito criadas desde aquele tempo até os dias atuais” (RUSSELL, 1926 apud JAMMER, 2006, p. 23). Zenão (490-430 a.C.) pretendia discutir questões acerca do tempo e do movimento, era discípulo de Parmênides (530 - 460 a.C.), e criou os paradoxos para defender a filosofia de seu mestre. Aristóteles, ao analisar mais tarde esses paradoxos, concluiu que em alguns deles havia o uso implícito da simultaneidade.

O primeiro paradoxo, chamado de *A Dicotomia*, argumenta que o movimento é impossível, pois um móvel tem sempre que cumprir metade da distância, e depois a outra metade, e assim por diante, até chegar ao seu destino. Como é possível dividir infinitamente uma distância pela metade, um processo ilimitado, seria necessário um tempo infinito. Nesse caso, não há o uso do conceito de simultaneidade.

O segundo paradoxo, chamado de *Aquiles e a Tartaruga*, também argumenta que o movimento é impossível, mas de maneira ligeiramente diferente do primeiro paradoxo. Assim, considere Aquiles na posição A e a tartaruga na posição B, inicialmente parados.

Figura 1: Aquiles e a Tartaruga.



Fonte: JAMMER, 2006, p. 25.

Ambos partem, na mesma direção e sentido, com Aquiles em velocidade maior perseguindo a tartaruga. Para alcançar a tartaruga, Aquiles deve alcançar a posição B de onde a tartaruga partiu, enquanto a tartaruga estaria, nesse mesmo instante, na posição C, e assim por diante, de forma semelhante ao primeiro paradoxo. Considera-se implicitamente que ambos partem e chegam **ao mesmo tempo** em cada estágio da perseguição, envolvendo um conceito de simultaneidade não-local infinitas vezes.

O terceiro paradoxo, chamado de *A Flecha*, argumenta que uma flecha lançada não pode se mover. Aristóteles sintetiza a argumentação da seguinte forma:

Tudo está ou em repouso ou em movimento, mas nada está em movimento quando ocupa um espaço igual a si mesmo, e o que está em vôo [movimento] está sempre em um dado instante ocupando um espaço igual a si mesmo; então a flecha voadora não tem movimento (ARISTÓTELES, apud JAMMER, 2006, p. 26).

Em princípio, como esse paradoxo se refere a um único objeto, não envolve a noção de simultaneidade. O filósofo von Fritz apresenta uma formulação alternativa, mas equivalente:

Nenhum objeto pode simultaneamente estar em dois lugares, ele está consequentemente onde ele está. Contudo, quando ele está em um lugar não se move. Mas em um lugar diferente (do que ele está) ele não pode se mover (FRITZ, 1978 apud JAMMER, 2006, p. 26, tradução nossa).

Explicando melhor, um objeto não pode se mover em um lugar

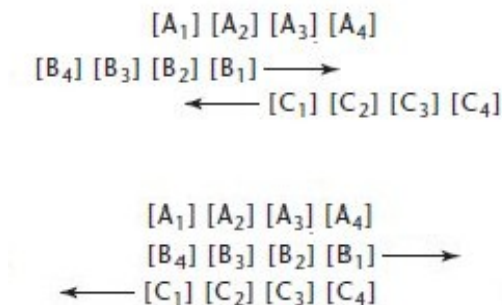
onde ele está, nem em um lugar onde ele não está. Zenão deixa em aberto a questão da flecha poder estar em dois lugares ao mesmo tempo, possibilitando o movimento sem que o objeto deixe de ocupar um espaço igual a si mesmo. Uma formulação mais completa desse argumento necessita do uso da noção de simultaneidade não-local.

Aristóteles refutou esse paradoxo, argumentando que ele se baseia na presunção de que o tempo é feito de “agoras”, e que isso precisa ser garantido primeiro. Esse paradoxo baseia-se na filosofia de Parmênides, que defendeu que *o tempo é uma ilusão*. Essa conclusão de Parmênides advém de sua ontologia, que toma o Ser (no sentido de existência) como uno e imutável. Isso significa que as coisas do mundo sensível não podem existir (o Ser) e possuírem propriedades contraditórias, por exemplo, uma pedra ser quente durante o dia (aquecida pela luz do sol) e fria à noite. Tudo o que se modifica no mundo sensível deve ser ilusão. Como a sensação de tempo está intimamente ligada às transformações (a pedra esfria durante um intervalo de tempo), a noção de tempo é ilusória. Por exemplo, o conceito de tempo aristotélico está associado ao movimento. A ontologia de Parmênides pode ser resumida da seguinte forma: “aquilo que é, é; lhe é impossível não ser” (WHITROW, 1993). Essa citação também pode ser chamada de princípio da identidade ( $A=A$ ). Para Parmênides, o tempo é uma sucessão de “agoras”.

Outros filósofos também apresentaram conceitos de tempo discretos, como o filósofo medieval iraniano Kalam (1055–1111) e o inglês John McTaggart (1866-1925). Ainda que o tempo fosse feito de “agoras”, Jammer (2006, p. 27) argumenta que o “agora” seria o mesmo para todos, envolvendo, portanto, a noção de simultaneidade. Qualquer que seja o conceito de tempo, contínuo ou discreto, a noção de simultaneidade está, de alguma forma, presente.

O quarto e último paradoxo de Zenão contra o movimento, conhecido como *Estádio*, é um pouco mais elaborado. Considere uma fileira de objetos AAAA, junto com outras duas fileiras BBBB e CCCC, todas estacionárias e do mesmo tamanho, como mostra a figura abaixo.

Figura 2: Estádio.



Fonte: adaptado de Jammer (2006, p. 28).

As fileiras B e C partem **simultaneamente**, a partir do ponto médio da fileira A, em sentidos opostos e com a mesma velocidade. O primeiro B e o primeiro C de cada fileira alcançam as extremidades opostas de A **simultaneamente**. Durante o processo, o primeiro C passou por toda a fileira B, enquanto o primeiro B passou por apenas metade da fileira A, gastando apenas metade do tempo da fileira C; pois leva igual tempo para C passar por um B, quanto B passar por um A. Mas o primeiro B também passou por toda a fileira C, enquanto passava por apenas metade da fileira A, pois ambos chegam às extremidades de A **simultaneamente**. A conclusão de Zenão é que metade do tempo - gasto quando uma fileira ultrapassa apenas metade da fileira A - é igual a todo ele - quando as fileiras em movimento ultrapassam uma à outra - resultando em uma contradição.

O equívoco de Zenão é o pressuposto assumido de que o tempo que uma fileira gasta para ultrapassar a outra é sempre o mesmo, independente se a fileira está parada ou em movimento. Nesse paradoxo, há o uso explícito do conceito de simultaneidade não-local, sem o qual seria impossível conceber a situação proposta.

Outro episódio importante, que envolve o conceito de simultaneidade, é a teoria de Platão (424-348 a.C.) para a criação do mundo material, realizada pelo Demiurgo. Platão diz, em *Timaeus* 38 B, que:

tempo e céu [mundo] venham a existir juntos a fim de que, tendo sido criados simultaneamente,

se houver a dissolução deles, eles podem ser dissolvidos simultaneamente (PLATÃO, apud JAMMER, 2006, p. 31, tradução nossa).

Uma forma de interpretar essa citação é enunciá-la da seguinte forma: “Se a criação do tempo realmente ocorreu, ela deve ter ocorrido no tempo”(JAMMER, 2006, p. 32). Esse uso do termo simultaneidade sugere a existência de um tempo T, criado pelo Demiurgo, e o T', em que ocorre a criação. Nesse caso, o termo simultaneidade se refere ao tempo T', onde ocorre a criação, e “tempo e o céu” se referem ao tempo criado T. Para que não se desloque o problema de T para T', numa regressão infinita, o tempo T' teria de ser desordenado, caótico, em contraste com T, ordenado. Assim a noção de simultaneidade em T' não pode ser entendida da mesma forma que em T (nem antes, nem depois). Detalhes adicionais sobre essa questão não são dados na obra de Jammer (2006) e envolvem dificuldade filosófica que não é relevante aos propósitos deste trabalho.

Mas Jammer (2006) contrapõe essa interpretação de Platão com a de Richard D. Morh, que diz: “Eu vou sugerir que, quando Platão afirma que o Demiurgo faz o tempo, isso significa que o Demiurgo faz um relógio, nada mais, nada menos”(MOHR, 1985 apud JAMMER, 2006, p. 33, tradução nossa). Esse relógio é formado pelo movimento dos corpos celestiais, que constituem a medida do tempo. Dessa forma, quando Platão diz que criou o tempo e o céu, está se referindo à mesma coisa, portanto o uso do termo simultaneidade seria redundante. Outra interpretação, similar, é reportada por Simplicio de Cilícia (490–560 d.C.), que é conhecido por ter escrito extensos comentários sobre as obras de Aristóteles. Segundo Simplicio, Eudemo de Rodes (370-300 a.C.), um dos mais famosos discípulos de Aristóteles, interpretou que Platão disse que o tempo é uma revolução no céu. Sendo assim, há uma identidade entre tempo e céu, portanto o termo simultaneidade, na citação de Platão, teria o sentido (não temporal) de “junto”.

Esse episódio mostra que, dependendo da interpretação que se adota de Platão, a noção de simultaneidade é responsável por sugerir uma dualidade temporal. Tempo e simultaneidade se mostram conceitos intimamente ligados. A especulação metafísica era parte essencial na formulação das teorias. Essa dualidade também aparece na interpretação de Aristóteles, como será visto adiante.

O discípulo mais famoso de Platão, e seu maior rival, foi Aristóteles (384-322 a.C.), que fez contribuições significativas sobre o

assunto, pois “os conceitos de simultaneidade e “agora” desempenham um papel importante no seu estudo filosófico do tempo, que é sem dúvida o mais exaustivo e profundo tratamento que os antigos gregos foram capazes de produzir” (JAMMER, 2006, p. 35).

Segundo Jammer (2006), a definição mais aceitável de simultaneidade encontra-se nos últimos quatro capítulos da obra *A Física*, que diz: “além disso, se a simultaneidade no tempo, e não sendo antes ou depois, significa coincidindo e estando no próprio “agora” em que coincidem, então...” (ARISTÓTELES, b apud JAMMER, 2006, p. 38, tradução nossa). O uso do condicional “se”, no início da definição, é uma característica do estilo literário de Aristóteles, e pode ser ignorado. Assim, uma definição alternativa seria: “Coisas estão temporalmente juntas quando o tempo imediato de ocorrência de uma é idêntico ao de outra (no sentido em que eles ocorrem no próprio agora em que coincidem)” (JAMMER, 2006, p. 38, tradução nossa).

Para Aristóteles, é inaceitável a existência de eventos sem duração, portanto o “agora” possui duração. Além disso, o “agora” divide e liga o passado ao futuro, sendo portanto (o “agora”) indivisível. Dessa forma, Jammer (2006) levanta três pontos importantes da teoria geral aristotélica do tempo: (1) simultaneidade de eventos em um “agora”; (2) indivisibilidade do “agora”; (3) duração do “agora”.

Conclui que essas sentenças “são, se tomadas em conjunto, logicamente incompatíveis. Basta renunciar à uma dessas três declarações para se ter uma teoria logicamente consistente” (JAMMER, 2006, p. 40, tradução nossa), tornando o conceito aristotélico de simultaneidade dificilmente compatível com sua própria filosofia geral sobre o tempo. Foge dos objetivos deste trabalho de mestrado analisar com maior profundidade essa incompatibilidade; no entanto, ela indica a dificuldade em estabelecer uma definição do conceito de simultaneidade.

O mais importante é que a definição aristotélica (estar no mesmo “agora”) não possui conteúdo operacional, ou seja, não há qualquer indicação sobre como descobrir se dois eventos distantes acontecem no mesmo “agora”. Segundo Jammer (2006, p. 41), na Antiguidade nunca se reconheceu que uma definição rigorosa de simultaneidade necessita da especificação de um procedimento físico operacional e, no caso de Aristóteles, isso se deve ao fato de que seria inconcebível com as aplicações filosóficas mais interessantes da noção de simultaneidade, como a teoria da luz e da visão de Aristóteles.

Para Aristóteles, a luz é uma ação causada por uma substância

incandescente (ígneia), que se propaga por um meio transparente. No entanto, a luz não é um movimento (de algo), como é o som; ela não viaja em um meio. Na propagação da luz, o meio é alterado todo de uma vez, como o congelamento da água. Isso significa, em termos físicos, que a velocidade da luz é infinita. Detalhes da teoria de visão de Aristóteles não são pertinentes, mas sim o fato de que a instantaneidade da visão torna-se uma consequência lógica da teoria da luz de Aristóteles, coincidindo com a experiência cotidiana. A simultaneidade visual,

mesmo que não explicitamente afirmada e apenas inconscientemente aceita, foi sem dúvida (e ainda é), em geral, não favorável à busca de uma definição operacional de simultaneidade. Além disso, por causa dessa tese todo mundo tomou a noção de simultaneidade [visual] por certa. (JAMMER, 2006, p. 43, tradução nossa).

Nos séculos seguintes, os comentadores de Aristóteles aceitaram sua teoria geral do tempo, e sua noção de simultaneidade, sem grandes reservas. No entanto, Jammer (2006, p. 43) apresenta as críticas de Stratus (335-269 a.C.), um dos discípulos de Aristóteles. Ele criticou a definição aristotélica de tempo como o número do movimento, alegando que o tempo é contínuo (não enumerável), já um número é uma quantidade determinada. Outro ponto importante é que as partes de qualquer número são simultâneas, “pois não poderia haver uma tríade sem três inteiros” (JAMMER, 2006, p. 44, tradução nossa). Se as partes do tempo, por exemplo passado e futuro, pudessem ser simultâneas, como as partes de um número, conduziriam à especulação de que existe um hipertempo, onde passado e futuro poderiam ser simultâneos.

Por último, neste capítulo, é apresentada uma discussão sobre a relação entre causalidade e simultaneidade. Segundo Jammer (2006),

A definição de Aristóteles sobre o tempo como o número do movimento, combinada com a sua concepção do movimento ou a mudança como uma transição da potencialidade ao ato, suprimiu qualquer tentativa de relacionar o tempo com a causalidade, embora ele tenha admitido que “o tempo faz com que as coisas envelheçam”



(JAMMER, 2006, p. 44, tradução nossa).

No entanto, Sexto Empírico apresentou os argumentos de Aenesidemus, um filósofo cético pirrônico, que disse

Se qualquer coisa é a causa de qualquer coisa, também o simultâneo é a causa do simultâneo (“hama”), ou o antes do depois, ou o depois do antes; mas o simultâneo não é a causa do simultâneo, nem o antes do depois, nem o depois do antes, como vamos estabelecer. Portanto, não existe qualquer causa (EMPÍRICUS, 1960 apud JAMMER, 2006, p. 45).

Aenesidemus usou a noção de simultaneidade para refutar a causalidade, ao contrário do que fizeram Leibniz e Kant séculos depois, quando usaram a causalidade para definir a noção de simultaneidade.

Na Antiguidade grega, os problemas parecem ter sido a maior fonte de episódios históricos com potencial para ampliar o significado do conceito de simultaneidade e fomentar discussões epistemológicas. Os problemas empíricos - tais como a determinação da circunferência da Terra por Eratóstenes e a refutação da Astrologia por Sexto Empírico - possuem ligação com os primórdios da Astronomia, uma área significativa do conhecimento científico da humanidade. Esses problemas exemplificam como o avanço do conhecimento está vinculado com a resolução de problemas, ilustrando a capacidade inventiva do ser humano, possuindo potencial para confrontar a visão aproblemática e ahistórica da ciência.

No campo teórico, os quatro paradoxos de Zenão constituem experimentos mentais. Tais experimentos são raciocínios lógicos sobre uma situação empírica imaginada. Tanto a formulação quanto a análise destes experimentos possuem diversas suposições teóricas. O terceiro paradoxo (A Flecha), por exemplo, supõe que o tempo é composto de “agoras”, como discutido anteriormente. Os paradoxos constituem, portanto, um contra-exemplo para a visão empírico indutivista e ateórica. Esses paradoxos também foram um palco de disputa entre duas concepções distintas sobre a essência e a existência da realidade, do tempo e do movimento (visões de mundo), e são: (1) Evidência da importância que o conceito de simultaneidade tem na formação de uma imagem física da realidade; (2) Oportunidade para desenvolver

discussões histórico-conceituais mais amplas envolvendo o conceito de tempo, apesar de não ser o foco deste trabalho de mestrado. A relevância desse problema na Filosofia Natural sugere que ele seja também um contra-exemplo frutífero para contestar a visão aproblemática e ahistórica da ciência.

Chama muito a atenção a dificuldade de Aristóteles em definir o conceito de simultaneidade de forma coerente com sua teoria geral do tempo, o que caracteriza aquilo que Laudan (2011, p. 69) designa de *problema conceitual interno*. Esse tipo de problema será melhor discutido no debate sobre a unicidade do tempo durante a Idade Média.

Como destaca Jammer (2006, p. 43), a tese da simultaneidade visual de Aristóteles não foi favorável à formulação de uma definição operacional de simultaneidade na Antiguidade e na Idade Média, ilustrando o papel que essa tese desempenha, quando funciona como pré-teoria, no desenvolvimento posterior do conceito de simultaneidade. O caráter ateuórico da ciência encontra aqui um contra-exemplo que se pode explorar com mais detalhes.

A Antiguidade grega termina sem consenso sobre o conceito de tempo (Parmênides e Aristóteles); entretanto, a teoria aristotélica foi muito debatida pelos filósofos dos séculos seguintes, especialmente na Idade Média.

## 2.2 CONCEITOS MEDIEVAIS DE SIMULTANEIDADE

A noção de simultaneidade aparece novamente vinculada ao contexto da Astrologia. Santo Agostinho (354-430), descrente nas adivinhações astrológicas, elabora uma refutação interessante, que consta no livro 7, capítulo 6, da sua obra *Confissões*. Tudo começa com a história de uma mulher rica e sua serva, que engravidaram ao mesmo tempo. Seus maridos contaram as semanas, dias e até frações de hora, a fim de determinarem o momento exato do nascimento, e consequentemente obter o horóscopo.

Quando as duas mulheres começaram a sentir as dores do parto, o pai de Firmino e seu amigo notificaram um ao outro o que se passava nas respectivas casas, e os mensageiros estavam a postos para levar informações, de uma casa para a outra, assim que o parto real fosse constatado. Cada um na sua província tomou as devidas

providências, para que a notificação fosse imediata. Ocorreu então que os mensageiros das respectivas casas se encontraram, disse ele, num ponto exatamente equidistante das duas casas, de modo que nenhum dos dois pôde calcular nenhuma diferença na posição dos astros e nenhum outro detalhe divergente (AGOSTINHO, 2013, p. 118).

O filho da senhora viveu na riqueza, enquanto o filho da serva teve o mesmo destino da mãe. Está implícito nesse método a suposição de que os mensageiros se deslocam com a mesma velocidade. Apesar de carecer de maior elaboração, o método utilizado por Santo Agostinho descreve a mais antiga definição operacional de simultaneidade não-local conhecida. Segundo Jammer (2006, p. 49), esse método pode ser considerado uma “antecipação” da definição operacional de simultaneidade não-local de Einstein. A diferença é que, para Einstein, a igualdade da velocidade dos mensageiros (sinais luminosos) surge num contexto diferente, é independente de qualquer referencial privilegiado.

A questão teórica mais importante levantada por Max Jammer neste capítulo é a discussão dos escolásticos medievais, dos séculos XIII e XIV, sobre a unicidade do tempo. Aristóteles, com sua definição de tempo como o número do movimento, já havia argumentado sobre sua unicidade. No entanto, os escolásticos, revisitando esses argumentos, concluem que a definição aristotélica possibilita a existência de intervalos de tempos iguais, mas não que o tempo seja o mesmo para todos os movimentos. O aprofundamento dessa questão exigiria um debate específico sobre o sentido de número que Aristóteles usa nessa definição, que foge aos objetivos desse trabalho de mestrado. O fato importante é que os escolásticos decidem reelaborar essa discussão sobre a unicidade do tempo, contribuindo decisivamente para a inversão da preferência ontológica que o movimento tem sobre o tempo.

Alexandre de Afrodisia argumentou, em sua obra *De Tempore*, datada do final do século II d.C., a necessidade de reformular a definição de tempo de Aristóteles, a fim de excluir a possibilidade da interpretação da pluralidade do tempo. Ele propôs definir o tempo a partir do movimento dos corpos celestes afastados, ou seja, do céu. Considerando que nesse momento vale a tese da simultaneidade visual de Aristóteles, pode-se considerar que Alexandre de Afrodisia “foi o primeiro a definir um tempo padrão mundial e, assim, dar a noção da

simultaneidade não local um significado espacialmente ilimitado” (JAMMER, 2006, p. 55, tradução nossa).

Outra maneira de enunciar a definição de Alexandre de Afrodisia é dizer que a posição dos corpos celestes é a mesma para todos os observadores do universo, e que valendo a tese da simultaneidade visual aristotélica nessa época, todos podem obtê-la igualmente. Torna-se possível determinar a simultaneidade de um par de eventos em qualquer parte do universo.

Levando o raciocínio adiante, se um evento é simultâneo para os observadores A e B, e simultâneo para B e C, também é simultâneo para A e C. Nessa definição de tempo, a simultaneidade ganha a propriedade de ser transitiva. Essa mesma propriedade de transitividade também é evidenciada na simultaneidade newtoniana, em contraposição à relatividade einsteniana. No entanto, adianta-se que não é possível afirmar que Alexandre de Afrodisia antecipou Newton. O conceito newtoniano deriva de um tempo absoluto, que transcorre sem interferência de qualquer coisa externa, assunto a ser discutido posteriormente. Já para Alexandre de Afrodisia, ele deriva do movimento do céu. Tal inversão de prioridade ontológica entre movimento e tempo só ocorrerá mais tarde, com Bernardino Telesio e Francesco Patrizi, no meio do século XVI.

Não contente com o caráter convencionalista do tempo universal de Alexandre de Afrodisia, o árabe Avicena (930-1037) procurou desenvolver uma explicação causal através de sua teoria das emanções. Para Avicena,

Essas emanções se originam em Deus e se propagam, a partir das esferas celestes, em direção à Terra. Este processo, apesar de eternamente duradouro, ocorre de tal forma que nele causa e efeito são simultâneos. A causa, e não apenas a medida de todos os movimentos no mundo, é o movimento circular dos céus (JAMMER, 2006, p. 55, tradução nossa).

Adicionada essa explicação dinâmica para o fluxo do tempo, sendo causa e efeito simultâneos, então o simultâneo é a causa do simultâneo. Isso contradiz a posição de Aenesidemus, vista anteriormente, no qual dois eventos simultâneos não podem ser um a causa do outro.

Mais tarde, Averroes (1126-1198), conhecido por seus extensos comentários sobre as obras de Aristóteles, concordou com Alexandre de Afrodisia e seu relógio padrão. Averroes se pergunta, mesmo sob um céu nublado, como podemos perceber o tempo? E conclui que experimentamos diretamente a passagem do tempo através da nossa própria mutabilidade. É com essa teoria subjetivista do tempo que Averroes

reconhece que todo o universo é, por assim dizer, um relógio único, cujo ritmo é regulamentado por meio de uma eficiência operacional instantaneamente causal, que se origina no movimento diurno do paraíso, mas que o organismo humano pode perceber (JAMMER, 2006, p. 56, tradução nossa).

Ainda sobre a percepção do tempo, William de Ockham argumenta que mesmo um cego de nascença, que não conhece o movimento celeste, sente a passagem do tempo. Para isso, bastaria o cego apreender que coexiste com um corpo (terreno) que se move uniformemente. Nesse caso, o termo “coexiste” não tem sentido temporal (simultaneidade), pois isso tornaria a argumentação circular. O cego compreenderia e sentiria o movimento celeste de maneira composta, indireta.

A questão epistemológica mais importante na Idade Média não está vinculada ao conceito de simultaneidade, mas ao de tempo. A maioria dos filósofos apresentados neste capítulo aceitaram a unicidade do tempo, mas eles não o fazem por concordarem com Aristóteles. O desenvolvimento do conceito de tempo ocorreu através de muitas críticas aos argumentos aristotélicos, culminando com uma reelaboração teórica acerca da unicidade do tempo. Esse episódio mostra um aspecto ainda mais profundo da inadequação da visão aproblemática e ahistórica, pois se trata de um tipo de problema que Laudan (2011, p. 69) argumenta ser ignorado pela maioria dos filósofos: **os problemas conceituais**. Neste caso específico, trata-se de um **problema conceitual interno**, isto é, uma contradição interna a uma teoria que a torna não consistente.

Ainda com relação ao aspecto problemático da ciência, o primeiro método operacional para determinar a simultaneidade não-local advém da tentativa de refutar a Astrologia, feita por Sexto Empírico.

Nesse caso, trata-se do que Laudan (2011, p. 22) chama de problema empírico. Na presente discussão, o método torna-se uma contribuição muito mais expressiva do que o seu objetivo, a refutação da Astrologia. No aspecto conceitual, sua semelhança com o que Einstein apresentará mais tarde é impressionante, ao ponto de Jammer (2006, p. 49) se referir a este episódio como uma “antecipação” a Einstein.

Mesmo havendo pouco sobre o desenvolvimento do conceito de simultaneidade neste período histórico - apenas a contribuição de Santo Agostinho - o conceito de tempo recebeu grandes contribuições. E foi necessário que ele se desenvolvesse além da concepção aristotélica, formando o substrato necessário para que mais tarde Newton elaborasse sua concepção de tempo. Isso só ficará mais claro a partir da colaboração adicional dos filósofos da Renascença, exposto mais adiante.

Há um razoável desenvolvimento cumulativo nesse período, pois não ocorreu um rompimento completo com as ideias aristotélicas. Manteve-se, por exemplo, a prioridade ontológica do movimento sobre o tempo. Isso ocasionou a contribuição de uns no trabalho de outros, por exemplo, a teoria das emanções de Avicena como um mecanismo causal para complementar o relógio padrão de Alexandre de Afrodísia. O desenvolvimento científico, já na Idade Média, mostrou-se um trabalho cooperativo, formando um contexto que poderia auxiliar no enfraquecimento da visão elitista da ciência.

## 2.3 O CONCEITO DE SIMULTANEIDADE NOS SÉCULOS XVI E XVII

Sem dar maiores detalhes, Jammer (2006, p. 59) afirma que a inversão da prioridade ontológica do movimento sobre o tempo ocorre a partir das contribuições dos filósofos italianos Bernardino Telesio e Francesco Patrizi, no meio do século XVI (Renascença). Segundo esses dois filósofos, Aristóteles estava certo ao dizer que é impossível medir o tempo sem movimento, mas que estava errado em afirmar que o tempo não podia existir sem movimento.

O próximo passo foi a teoria proposta pelo jesuíta Francisco Suarez (1548-1617), que defendia a existência de dois modos de tempo: um tempo medido pelo movimento (duração intrínseca sucessiva) e um tempo mental (sucessão contínua imaginária). Aqui há um fato curioso: um evento poderia ser relacionado com dois tempos, em vez de dois

eventos com um tempo, o que torna o conceito de simultaneidade algo bem mais complexo.

A unicidade do tempo ainda não era consenso até que Pierre Gassendi (1592-1655) abolisse completamente a duração intrínseca sucessiva (tempo mecânico) em favor da sucessão contínua imaginária (tempo mental). Para Gassendi, os movimentos ocorrem no tempo, invertendo de vez a preferência ontológica do tempo sobre os movimentos. Os céus podem servir como um relógio, no entanto, o tempo não deixaria de fluir mesmo se os céus deixassem de se mover. Segundo Gassendi, o tempo também não tem começo nem fim, e é o mesmo em todos os lugares. Gassendi formulou a primeira teoria de tempo absoluto, que transcorre sem a interferência dos movimentos. Apesar do avanço teórico, a medição de eventos simultâneos ainda era extremamente difícil por conta da inexistência de relógios mecânicos de precisão, fazendo com que o conceito de simultaneidade não-local não fosse muito explorado na prática.

Uma notável exceção ocorreu por causa da expansão do comércio marítimo, pois se tornou essencial a determinação precisa da longitude e latitude de um navio em alto mar. A latitude é mais facilmente determinada, por exemplo, através de métodos que utilizam a observação da altura de algumas estrelas. No entanto, a determinação da longitude era uma tarefa muito mais complicada. Segundo Jammer (2006, p. 62), o primeiro a propor um método utilizando-se do conceito de simultaneidade não-local foi Reinerus Gemma (1508-1555), em 1530. Ele sugeriu

sincronizar um relógio portátil confiável com um relógio mestre estacionário no ponto de partida, dizem que usou o relógio da Catedral de Antuérpia; deixar o relógio sincronizado a bordo do navio e, quando em alto mar, comparar sua leitura com a hora local do navio, por exemplo, com o meio-dia solar; como a diferença de uma hora corresponde a 15 graus de longitude, a diferença de tempo obtida por esta comparação dividido por 15 dá a longitude da localização do navio em relação ao ponto de partida (JAMMER, 2006, p. 63, tradução nossa).

Essa necessidade social, associada a um método que utilizava a

noção de simultaneidade não-local, levou a uma corrida pela construção de relógios portáteis cada vez mais precisos. Após mais de um século de desenvolvimento dos relógios de precisão, o primeiro que conseguiu atender as necessidades da navegação comercial foi construído pelo relojoeiro John Harrison, em 1773, e necessitou de toda uma vida de dedicação. É preciso lembrar também que esses primeiros relógios marítimos utilizavam o fenômeno do isocronismo de um pêndulo, proposto pela primeira vez pelo matemático e astrônomo italiano Galileu Galileu (1564-1642), em 1581, conhecimento fundamental para o desenvolvimento da tecnologia da época.

O desenvolvimento de relógios mecânicos precisos, por sua vez, foram essenciais para a medição da velocidade da luz, fenômeno que o próprio Galileu havia tentado, sem sucesso, determinar. Novamente, a partir de uma contribuição de Galileu - a descoberta das luas de Júpiter - o astrônomo italiano Giovanni Domenico Cassini (1625-1712) elaborou uma tabela com os movimentos desses satélites, em 1665, tornando possível prever seus eclipses.

Alguns anos depois, em 1676, o astrônomo dinamarquês Olaf Roemer (1644-1710) descobriu que

estes eclipses começavam cerca de sete minutos antes do previsto, quando a Terra está entre o Sol e Júpiter, e cerca de sete minutos depois do previsto quando a Terra está além do sol. Ele explicou essas observações como uma indicação de que a velocidade da luz, ou, como ele chamava, "retardamento da luz", é uma quantidade finita (JAMMER, 2006, p. 63, tradução nossa).

Embora Jammer não comente, Roemer utilizou dados referentes ao satélite hoje conhecido como Io. Esse atraso nos eclipses permitiu a Roemer realizar a primeira determinação da velocidade da luz no âmbito da Astronomia. Assim, “a descoberta de Roemer pôs fim para o que temos chamado de a tese de simultaneidade visual” (JAMMER, 2006, p. 64, tradução nossa), que vigorava desde Aristóteles, e que havia desestimulado a busca por uma definição operacional da simultaneidade. Mas foi somente com a descoberta do fenômeno da aberração estelar, em 1728, pelo astrônomo inglês James Bradley (1693-1762), que houve aceitação geral sobre a velocidade finita da luz. Esse fenômeno permitiu a Bradley realizar novo cálculo da velocidade da luz.



Nesse ponto Jammer (2006, p. 63) deixa claro que, antes de Roemer já haviam especulações acerca da velocidade finita da propagação da luz, que foram feitas por Empédocles, Francis Bacon e Avicena e Galileu. Sem aprofundar essa questão, o importante é a percepção de que

a realidade difere consideravelmente da sua aparência. A imagem simultânea do mundo, como pode ser visto pelos nossos olhos, é uma ilusão. Mas, é claro, se as distâncias e as velocidades são pequenas, como são em nossa vida cotidiana, essa diferença entre a ilusão e a realidade torna-se insignificante (JAMMER, 2006, p. 64, tradução nossa).

Tal questão será discutida muito mais profundamente no início do século XX, com a formulação da teoria da Relatividade Restrita de Einstein. Outro assunto abordado neste capítulo é o sincronismo psicofísico, formulado pelo filósofo Arnold Geulincx (1624-1669), para resolver o problema da ação da mente no corpo, e vice versa, suscitada pela filosofia de Descartes. Tal problema é essencialmente filosófico, e não será abordado neste trabalho de mestrado.

O último episódio apresentado neste capítulo é a determinação das distâncias Terra-Marte, feita por Cassini e seu colega Jean Richer (1630–1696) em 1671, utilizando o método da paralaxe. Esse método consiste em obter a diferença angular entre duas observações feitas, simultaneamente, de locais com distância conhecida entre si. As observações foram realizadas na França, por Cassini, e na Guiana Francesa, por Richer. Como os relógios marítimos ainda não estavam suficientemente desenvolvidos antes de 1773 (relógio de Harrison), eles utilizaram a tabela de movimentos das luas de Júpiter para sincronizar as medições. De posse dessa distância, e utilizando a terceira lei de Kepler, foi possível calcular, pela primeira vez, a distância interplanetária de todos os planetas do sistema solar conhecidos na época.

A questão epistemológica que mais chama a atenção neste capítulo é a interação entre Ciência, Tecnologia e a Sociedade. A necessidade do comércio marítimo culminou (por conta do método de Gemma) com a construção de relógios portáteis mais precisos. O desenvolvimento comercial da época foi responsável também pela colonização da América e da África. Esse episódio ilustra que a ciência

não é um empreendimento a parte, mas integrado com o desenvolvimento humano, e contrapõe a visão da ciência socialmente neutra.

Os **problemas empíricos**, como a determinação das distâncias interplanetárias, o cálculo da velocidade da luz por Roemer e a determinação da longitude pelo método de Gemma, tiveram papel fundamental neste período. O caso de Roemer se contrapõe à noção empírico-indutivista ateórica da ciência. Ele confiou nos relógios nem tão precisos da época, em detrimento da tese da simultaneidade visual aristotélica, e interpretou o atraso dos eclipses como sendo causado pela velocidade finita da luz, desafiando um paradigma de quase dois mil anos de existência.

No campo teórico, a inversão da prioridade ontológica do movimento sobre o tempo constituiu um marco importante. Segundo Martins e Zanetic (2002), foi nessa época que Galileu rompeu com a descrição do movimento de queda dos corpos em função da distância percorrida e elaborou uma teoria espaço-temporal, onde a velocidade sofre acréscimos constantes em intervalos de tempo constantes, descrevendo corretamente a queda livre dos corpos. O conceito de tempo passou de mero coadjuvante para assumir o papel de protagonista. A julgar pela proximidade cronológica e geográfica, pode-se especular se as contribuições teóricas de Bernardino e Telesio influenciaram Galileu, e são um contra-exemplo da concepção acumulativa e linear, visto que há um rompimento (inversão) com o conhecimento anterior. Essa inversão ocorreu por conta dos desenvolvimentos teóricos da Idade Média, oriundos das críticas ao tempo aristotélico. O grande número de personagens envolvidos, tanto cientistas quanto filósofos, também ilustra o caráter coletivo do empreendimento científico, em detrimento da visão elitista da ciência.

## 2.4 O CONCEITO DE SIMULTANEIDADE NA FÍSICA CLÁSSICA

Não foi apenas Gassendi que colaborou para o desenvolvimento do conceito clássico (e newtoniano) de tempo e simultaneidade. Contribuições anteriores partem desde a Grécia antiga, onde matemáticos como Autólico de Pitane (330-280 a.C.) já usavam “a noção do tempo como logicamente anterior ao movimento, antecipando sua concepção clássica” (JAMMER, 2006, p. 68, tradução nossa). Já na Idade Média, o tempo também foi representado como variável

independente pelos filósofos da Escola de Merton, contribuindo para os estudos cinemáticos de Galileu que, por sua vez, influenciou a elaboração da mecânica, por Isaac Newton (1643-1727).

Segundo Jammer (2006, p. 69), a concepção de tempo absoluto de Newton foi inspirada, principalmente, pelas obras de seu professor em Cambridge, Isaac Barrow (1630-1677). Para Barrow, o tempo não implica em movimento, pois na medida em que é da natureza intrínseca do tempo ser absoluto, não importa se as coisas se movem ou ficam paradas, se estamos dormindo ou acordados. Mesmo se as estrelas não se movessem no céu, o tempo fluiria seguindo seu próprio curso. Segundo Jammer (2006, p. 69), essa é provavelmente a primeira atribuição do predicado “absoluto” ao tempo. A simultaneidade seria uma relação temporal de coincidência no mesmo tempo absoluto, ou seja, eventos simultâneos são aqueles que ocorrem no mesmo tempo absoluto. Decorrente da natureza absoluta do tempo, processos que comecem e terminem simultaneamente necessariamente duram tempos iguais.

Apesar de o tempo independer dos processos físicos, Barrow admite que o movimento deve ser usado para medir o tempo, como por exemplo o movimento dos astros. No entanto, ele se pergunta como se pode saber que os movimentos dos astros se repetem com a mesma duração? Essa pergunta lança o problema de se é possível medir intervalos de tempo que ocorrem um após o outro (separados). A resposta de Barrow é positiva, pois se pode comparar diferentes maneiras de medir o tempo através de relógios artificiais, como clepsídras ou ampulhetas.

O problema de verificar a simultaneidade de eventos espacialmente distantes nunca foi discutido por Barrow, no entanto ele insistiu na unidimensionalidade do tempo, e em sua representação geométrica através de uma linha reta. Sem entrar em maiores detalhes, Jammer (2006, p. 72) diz que isso foi fundamental para os estudos posteriores sobre o tempo e simultaneidade.

No *Principia*, Newton distingue tempo absoluto de tempo relativo:

O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo, e a partir da sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa, e é também chamado de duração; o tempo relativo, aparente e comum, é uma medida

do tempo perceptível e externo (seja a medida exata ou desigual) que é obtida através dos movimentos e que é normalmente usada no lugar do tempo verdadeiro; tal como uma hora, um dia, um mês, um ano (NEWTON, 1934, p. 6, tradução nossa).

Newton, em sua obra *De Gravitatione et Aequipondio Fluridorum*, também advogou pela onipresença de um intervalo de tempo em todos os pontos do espaço, ou seja, que o tempo marcha igualmente em todos os locais do universo, assim como Gassendi havia feito anteriormente em seu conceito de tempo absoluto. Isso provavelmente não é coincidência, pois “Newton deve ter tido conhecimento da filosofia de Gassendi sobre o tempo, porque ele leu o Compêndio de Walter Charleton’s sobre Gassendi” (JAMMER, 2006, p. 72, tradução nossa).

Assim como Barrow, Newton nunca discutiu nem propôs uma maneira de determinar a simultaneidade de eventos distantes. No entanto, o conceito de simultaneidade implícito em seu conceito de tempo é “ao mesmo tempo absoluto”. Como o tempo absoluto transcorre independente de qualquer processo físico, Newton deixa a questão em aberto se o tempo pode ser medido precisamente através de processos físicos, e com ele uma definição operacional de simultaneidade. O tempo absoluto de Newton advém, mas não só, da sua confiança na existência do espaço absoluto, com a famosa experiência do balde. E, principalmente, da sua crença teológica, que ele expressa claramente quando disse que Deus

é eterno e infinito, onipotente e onisciente; isto é, seu tempo alcança da eternidade à eternidade, sua presença do infinito ao infinito [...] Ele dura pra sempre, e está presente em todo lugar, e, por existir sempre e em todo lugar, ele constitui o tempo e o espaço. (NEWTON, 1934, p. 545, tradução nossa).

A onipresença divina, no tempo e no espaço absolutos, em todo o universo constitui o *Sensorium* de Deus. A simultaneidade não-local absoluta é garantida pela onipresença divina, mas inacessível operacionalmente ao ser humano, que está limitado às observações da

sua imediata vizinhança, através de um tempo medido por processos físicos (o tempo relativo de Newton). Por conta dessas concepções fundamentalmente metafísicas e teológicas sobre o espaço e o tempo,

a concepção de Newton da simultaneidade, como dito acima, difere da noção de simultaneidade da física clássica pós Newton, em que considerações teológicas já não eram consideradas como argumentos constitutivos em seus sistemas teóricos (JAMMER, 2006, p. 74, tradução nossa).

As fortes objeções dos físicos e filósofos pós-newtonianos aos conceitos metafísicos de Newton, como John Locke, George Berkeley e Gottfried W. Leibniz, distinguem a simultaneidade absoluta de Newton, não operacional, da simultaneidade da Física Clássica, que

Embora raramente, ou quase nunca explicitamente, discutirem este conceito [simultaneidade], os físicos clássicos não tinha dúvidas de que o conceito de simultaneidade não-local é uma noção operacionalmente testável, por exemplo, pelo emprego de relógios sincronizados (JAMMER, 2006, p. 74, tradução nossa).

Mesmo sendo admirador das obras de Newton, John Locke (1632-1704) não aceitou as concepções newtonianas de tempo (absoluto e relativo). No seu sistema filosófico, anti platônico, existem as ideias simples, de origem nas sensações, e as ideias complexas, formadas pela combinação de ideias simples. Para Locke, duração e tempo são ideias complexas, aparecem quando apreendemos as ideias uma após a outra, em uma sucessão. A “distância” entre dois pensamentos sucessivos é chamada de duração, e o tempo definido como a medida da duração. A concepção de tempo de Locke deriva da sua noção de continuidade psicológica de ideias; é dependente de um observador consciente de seus pensamentos, portanto, incompatível com as concepções temporais newtonianas.

Locke também não fez uso explícito do conceito de simultaneidade, no entanto, ele usou implicitamente a noção de simultaneidade em sua monumental obra *An Essay concerning Human Understanding*. Para Locke, a simultaneidade aparece como a

coexistência de quaisquer coisas em nosso pensamento; assim ele “atribuiu à noção de simultaneidade lógica prioridade sobre a noção de tempo, um processo com o qual antecipou Leibniz e Einstein” (JAMMER, 2006, p. 76, tradução nossa).

Discordando de Barrow, Locke argumenta que não é possível estabelecer uma duração padrão, da mesma forma que é possível estabelecer um padrão de extensão, a fim de medir o tempo. No entanto, Locke admite que a melhor maneira de medir o tempo é através de repetições aparentemente iguais, como o movimento do Sol e da Lua.

Outro crítico de Newton foi o filósofo irlandês George Berkeley (1685-1753). Suas objeções podem ser sintetizadas em termos de dois pontos principais. Em primeiro lugar, Berkeley discordou da interpretação de Newton sobre a experiência do balde. Segundo Berkeley, Newton pressupõe que o mesmo resultado ocorreria em um universo com um só corpo, o balde girante, o que não pode ser garantido. Para Berkeley, movimentos só podem ser concebidos como relativos, portanto necessitam de, pelo menos, dois corpos. Assim, em um universo com um só corpo, o movimento seria impossível. Em segundo lugar,

tempo, de acordo com Berkeley, consiste meramente em sensações que passam na mente dos seres perceptivos, é inteiramente relativo a eles e, portanto, pode diferir de pessoa para pessoa (JAMMER, 2006, p. 77, tradução nossa).

Berkeley rejeitou não só o tempo absoluto, como um tempo em comum para todas as coisas. O mais interessante nesse conceito de tempo é que ele exclui a existência de uma simultaneidade temporal.

Um dos maiores críticos e concorrente de Newton foi Gottfried Leibniz (1646-1716), em um embate de idéias amplamente conhecido e que envolve não só os fundamentos da mecânica, mas também a elaboração do cálculo diferencial e integral. Segundo Jammer (2006, p. 78), o que não é tão conhecido é que a teoria do tempo relacional de Leibniz dá ao conceito de simultaneidade um papel central. Nesse momento, considera-se adequado uma citação direta, apesar de extensa, tal qual faz o próprio Max Jammer, para expor o pensamento de Leibniz:

Se uma pluralidade de estados de coisas que se presume existir não envolve oposição umas as

outras, diz-se que existem simultaneamente. Assim, negamos que o que ocorreu no ano passado e este ano sejam simultâneas, pois envolve incompatíveis estados da mesma coisa.

Se um dos dois estados que não são simultâneos envolver uma razão para o outro, o primeiro é considerado prévio, o subsequente posterior. Meu estado anterior envolve uma razão para a existência do meu estado posterior. E desde que o meu estado prévio, por motivo da conexão entre todas as coisas, envolve o estado prévio de outras coisas também, envolve também uma razão para o estado posterior dessas outras coisas e é assim anterior a elas. Portanto, tudo o que existe é simultâneo com outras existências, ou prévia ou posterior.

*Tempo* é a ordem da existência das coisas que não são simultâneas. Assim, o tempo é a ordem universal das mudanças, quando não levamos em consideração os tipos particulares de mudança.

Duração é a magnitude de tempo. Se a magnitude do tempo é diminuída de modo uniforme e continuamente, o tempo desaparece no momento, cuja magnitude é zero.

*Espaço* é a ordem das coisas coexistentes, ou a ordem da existência das coisas que são simultâneas (LEIBNIZ, 1855 apud JAMMER, 2006, p. 80, tradução nossa).

Em primeiro lugar, Leibniz define simultaneidade, não como um conceito temporal para evitar uma circularidade, mas como a coexistência de coisas que não são a causa uma da outra. A simultaneidade tem prioridade sobre o conceito de tempo, o que é fato inédito, pois “antes de Leibniz publicar sua teoria, sempre foi entendido que a simultaneidade poderia ser definida somente após a noção de tempo ser definida” (JAMMER, 2006, p. 80, tradução nossa). A diferença crucial entre a concepção newtoniana e a de Leibniz, nas

palavras de Jammer:

Segundo a teoria de tempo absoluto de Newton, momentos de tempo existem em seu direito próprio, já de acordo com a teoria de tempo relacional de Leibniz, momentos são classes de eventos definidos por meio do conceito de simultaneidade (JAMMER, 2006, p. 78, tradução nossa).

A inspiração para conceber um conceito de simultaneidade não temporal, e com isso definir o que é tempo, parece ter surgido a partir de seus estudos da obra *Categorias*, de Aristóteles. No entanto, não se considera adequado aos objetivos deste trabalho de mestrado aprofundar-se nas influências do trabalho de Leibniz.

Outro filósofo que elaborou um tratamento sofisticado sobre tempo e simultaneidade foi Immanuel Kant (1724-1804). Inicialmente, Kant havia concordado com Leibniz, depois com Newton, mas posteriormente criticou-os, desenvolvendo as próprias concepções sobre tempo e simultaneidade. Não é objetivo desse trabalho de mestrado explorar a evolução do pensamento kantiano; portanto serão apresentadas as críticas de Kant a Leibniz e a sua concepção final sobre espaço e tempo.

Para Kant, a definição de tempo de Leibniz, como a sucessão de estados das coisas, é circular, pois a noção de sucessão já pressupõe a noção de tempo. Kant admite uma representação geométrica do tempo como uma linha reta, infinita, em que a simultaneidade de eventos é determinada por um reta transversal que corta a linha do tempo. Segundo essa geometrização do tempo, Max Jammer sugere que Kant

poderia ter pensado em duas séries de evolução de estados, ditas S e S', representadas por duas retas paralelas. Antes de simultaneidade ser definida, nenhum estado de S' é sucessivo a qualquer estado de S e vice-versa. Daí que a definição de Leibniz permitiria decretar uma escolha arbitrária de estado de S' a ser simultânea com um determinado estado de S, e a simultaneidade acabaria sendo apenas uma questão de convenção. (JAMMER, 2006, p. 84, tradução nossa).



Para Kant, a relação entre eventos simultâneos não pode ser uma mera convenção, logo ele é um crítico de qualquer tese convencionalista, como se verá mais tarde com Poincaré e Reichenbach. Ao rejeitar a noção de simultaneidade como sendo “a antítese da sucessão” (JAMMER, 2006, p. 85), Kant retoma a prioridade do tempo sobre a simultaneidade. Isso torna necessário discutir a noção de tempo de Kant que, segundo Jammer (2006, p. 87), tem sua elaboração final na obra *A Crítica da Razão Pura*. Nesta obra, Kant argumenta que o tempo (e o espaço) não são noções derivadas da experiência, mas por elas pressupostas – são pura intuição. Somente com essas noções *a priori* é que se pode falar de coisas que acontecem sucessivamente ou simultaneamente. Kant chama essas noções prévias e universais de juízo sintético *a priori*.

O próximo ponto de Kant é diferenciar a ordem subjetiva e aparente das coisas, percebidas pelos sentidos humanos, da ordem objetiva temporal dos acontecimentos, “por exemplo, quando vemos o relâmpago antes de ouvirmos o trovão” (JAMMER, 2006, p. 88, tradução nossa). Com relação a eventos sucessivos, um evento *e1* é dito preceder um outro evento *e2* se, e somente se, em conformidade com alguma lei da natureza, *e1* é a causa de *e2* e *e2* não for a causa de *e1*.

Com relação a eventos simultâneos, Kant considera que eventos são simultâneos se eles não são sucessivos, e portanto cortam no mesmo ponto a linha do tempo. Note que isso não é a antítese da sucessão, como defende Leibniz, pois para Kant a sucessão só existe se primeiro existe a noção *a priori* de tempo. Se dois eventos *e1* e *e2* são simultâneos, uma das duas condições é satisfeita: (1) O evento *e1* não é a causa de *e2*, nem *e2* é a causa de *e1*; ou (2) *e1* é a causa de *e2* e *e2* também é a causa de *e1*, fazendo com que esses dois eventos possuam uma profunda interação mútua. Jammer (2006, p. 89) argumenta que Kant, quando fala de interação mútua, certamente estava pensando na atração gravitacional newtoniana, entendida como instantânea até o desenvolvimento da Relatividade Restrita, no início do século XX.

Arthur Schopenhauer (1788-1860), posteriormente, analisou a questão da causalidade e concluiu que ela implica necessariamente em sucessão. Assim sendo, ele criticou a noção de reciprocidade presente na segunda condição de simultaneidade de Kant, pois se dois eventos são a causa e efeito um do outro, significa também dizer que esses dois eventos são sucessivos e antecedentes um do outro, o que é absurdo.

Concordando com Kant, George Lechalas formulou um procedimento operacional para definir a simultaneidade não-local,

através do exemplo da ação gravitacional (interação mútua) newtoniana.

Sejam  $P$  e  $P'$  dois corpos ou partículas interagindo um com o outro, de acordo com a lei da gravitação de Newton. Supondo que o estado dinâmico de cada partícula é totalmente determinado por propriedades que não contêm explicitamente a variável tempo, denotamos por  $Z_m$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ) os estados de  $P$  e por  $Z'_n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) os estados de  $P'$ . Seja  $F_m$  a força exercida sobre  $P$  por  $P'$  quando  $P$  está em estado  $Z_m$ . Correspondentemente, seja  $F'_n$  a força exercida sobre  $P'$  por  $P$ , quando  $P'$  está em estado  $Z'_n$ . Para um dado estado  $Z_m$  associado com  $F_m$ , selecionamos um  $F'_n$  que satisfaz a equação  $F'_m = F'_n$  (ação = reação). Então o estado  $Z_m$  de  $P$  é simultâneo com o estado de  $Z'_n$  de  $P'$  e a simultaneidade não local é estabelecida (JAMMER, 2006, p. 90, tradução nossa).

Várias críticas foram feitas por van Fraassen (1970, p. 54-57) em sua obra *A introduction to the Philosophy of Time and Space*. A primeira delas é que para conhecer os estados ( $Z_n$  e  $Z_m$ ) dos corpos, na Física Clássica, é necessário conhecer posição e velocidade. A velocidade é um conceito temporal, tornando o raciocínio circular.

A segunda crítica é de que não existem apenas dois corpos no universo, portanto as forças com que  $P$  e  $P'$  se atraem não são iguais às forças resultantes sobre essas partículas. Desse modo, seria necessário conhecer a posição e a velocidade (estados) de todos os outros corpos no universo, a fim de descontar essa influência e conhecer as forças recíprocas de atração. Em outras palavras, “a atração gravitacional (concebida classicamente) não pode ser usada para correlacionar as histórias de vários corpos que gravitam” (FRAASSEN, 1970, p. 56, tradução nossa).

Um último apontamento de Fraassen (1970, p. 56) é que Lechallas, ao utilizar as leis da mecânica para determinar a ordem temporal dos acontecimentos, não garantiu que essa ordem é única. Ou seja, pode existir mais de uma ordem temporal para a evolução de um sistema que seja compatível com as leis da mecânica. Existindo mais de uma ordem, as leis da mecânica não são suficientes para determinar a ordem temporal da evolução de um sistema.

Max Jammer expõe um argumento semelhante ao de van Fraassen, de que

a determinação ou a medição da velocidade pressupõe o conceito de simultaneidade, um fato que tem sido ignorado, em geral, mas que desempenha um papel importante nas discussões modernas sobre o conceito de simultaneidade” (JAMMER, 2006, p. 90, tradução nossa).

Max Jammer e van Fraassen reconhecem a importância de Lechallas, ao insistir no uso de argumentos físicos, em vez de estritamente filosóficos, para determinar a ordem e a simultaneidade de eventos. Segundo Jammer (2006, p. 90), os argumentos de Lechallas foram publicados primeiramente em 1895 e marcam um ponto de mudança, onde as considerações físicas começaram a substituir os argumentos filosóficos nas discussões sobre o conceito de simultaneidade.

Outro passo importante para essa virada foi a contribuição de Christoph Tübingen Sigwart (1830–1904). Sigwart concordou com Kant sobre a existência apriorística da noção de tempo como um ingrediente necessário para a consciência. Entretanto, esse tempo tem caráter subjetivo, e não é suficiente para a determinação temporal precisa dos fatos e sensações apreendidas por uma auto consciência. Seria necessário um sistema temporal objetivo e comum a todos, ao qual os fatos da consciência possam ser referidos. Como uma consciência só se comunica com outra através de sinais externos, o estabelecimento desse sistema temporal necessitaria do compartilhamento da percepção de sinais externos que ocorrem simultaneamente para todos. Apesar de Sigwart não estabelecer esse sistema temporal, o importante é notar que ele atribuiu à noção de simultaneidade um papel fundamental para a determinação desse sistema temporal objetivo, tal qual fará também mais tarde Einstein.

Com relação às considerações epistemológicas, a principal questão sobre o tempo e a simultaneidade neste período histórico se refere a determinar conceitualmente, e consistentemente, o que é o tempo e a simultaneidade, ou seja, a resolver um *problema conceitual interno* (LAUDAN, 2011, p. 69). Esse problema tem sido trabalhado por filósofos desde a Idade Média, quando resolveram reelaborar o conceito de tempo aristotélico para garantir a unicidade do tempo, como foi

discutido anteriormente.

Neste período histórico muitas concepções sobre tempo apareceram, tais como o tempo absoluto (Barrow e Newton), tempo psicológico ou subjetivo (Locke, Berkeley), tempo inato (Kant) e o tempo como uma convenção (Leibniz). Como consequência, também apareceram as mais variadas concepções de simultaneidade, como a simultaneidade absoluta (Barrow e Newton), a simultaneidade advinda de relações entre eventos (Kant, Leibniz), simultaneidade como coexistência (Locke) e até mesmo a inexistência da simultaneidade (Berkeley). A falta de linearidade sugere que esse episódio é um contra-exemplo da noção acumulativa e linear do desenvolvimento da ciência.

Do ponto de vista conceitual, este período é marcado por um rico debate entre concepções de tempo. Como será mostrado no próximo capítulo da dissertação, esse fato é completamente omitido nos livros de física geral universitários que foram analisados. Isso pode causar a impressão de que nada ocorreu entre Newton e Einstein, ou, pior ainda, que os livros tentem fazer uma comparação direta entre as concepções newtonianas e einstenianas sem o cuidado de apontar as discussões intermediárias, sem as quais a concepção einsteniana não teria se desenvolvido.

A influência de Barrow e Gassendi em Newton, bem como as críticas de Leibniz, Locke, Berkeley e Kant, sugerem que estes cientistas e filósofos estavam conscientes do trabalho de seus antecessores, em um ambiente de efervescência de ideias. Esse ponto pode ser explorado para contrastar a visão individual e elitista da ciência.

A experimentação controlada já era largamente utilizada neste período, no entanto, os maiores avanços com relação ao conceito de tempo, e simultaneidade, não ocorreram por meio de experimentações, pelo contrário, foram principalmente através do intenso trabalho teórico sobre um problema de elaborar uma concepção de tempo consistente. Esse episódio torna-se um contra-exemplo bastante incisivo da visão empírico indutivista ingênua da ciência.

## 2.5 A TRANSIÇÃO PARA O CONCEITO RELATIVISTA DE SIMULTANEIDADE

Neste capítulo, o primeiro episódio abordado por Jammer foi a rejeição, pelos filósofos positivistas, dos conceitos metafísicos como o espaço e o tempo absolutos, em particular, a crítica feita pelo físico

austriaco Ernst Mach (1838-1916). Segundo Jammer (2006, p. 96), muito se tem escrito sobre as críticas de Mach ao espaço e movimento absolutos de Newton, mas pouco se comenta sobre suas críticas ao tempo absoluto de Newton, e menos ainda sobre o conceito de simultaneidade. No entanto, a noção de tempo ocupou muito mais a atenção de Mach do que o conceito de espaço.

Para Mach, o tempo absoluto de Newton, como uma realidade independente, não existe, é um conceito metafísico supérfluo. Entretanto, o tempo é utilizado na física como um coordenador entre processos distintos. Para exemplificar a questão, Mach costuma recorrer ao exemplo do esfriamento de um corpo quente e uma queda livre. Esses dois fenômenos são descritos através de equações que contêm a variável tempo, portanto o tempo pode ser eliminado das equações e a temperatura pode ser determinada pela altura da queda.

Mach também nunca discutiu a noção de simultaneidade por si só, o que não é surpreendente “pois a sua rejeição ao tempo necessariamente implicava a rejeição da simultaneidade como um conceito temporal” (JAMMER, 2006, p. 97, tradução nossa). Max Jammer extrapola, a partir desse conceito de tempo de Mach, um conceito de simultaneidade destemporalizado (não temporal).

A coexistência ou copresença de acontecimentos, que são normalmente chamados eventos simultâneos, não é a consequência de sua coincidência com um determinado momento do tempo, pois, novamente, um momento não existe por si próprio. Em outras palavras, os chamados eventos simultâneos acontecem simplesmente por coexistirem sem o intermédio de qualquer relação temporal com um momento comum de tempo (JAMMER, 2006, p. 97, tradução nossa).

As críticas de Mach aos fundamentos da mecânica influenciaram muito os físicos do final do século XIX, principalmente o jovem (na época) Einstein.

Outro importante personagem na discussão sobre o espaço e o tempo foi o matemático e físico francês Henri Poincaré (1854-1912). A descoberta das geometrias não-euclidianas foi fator decisivo para seus estudos epistemológicos acerca do tempo e do espaço. Para Poincaré, os axiomas da geometria não são juízo sintético a priori nem resultado de

observações experimentais, mas convenções arbitrárias, convenientes. Assim sendo, não faz sentido falar em verdadeira geometria, assim como não faz sentido também falar em um sistema métrico verdadeiro, se tais coisas advêm de princípios que são convenções. Tal postura filosófica caracteriza Poincaré como adepto da tese convencionalista, que defende que não há uma única teoria verdadeira para explicar a natureza, mas sim a possibilidade de várias teorias, igualmente satisfatórias.

Embora as leis da natureza não sejam meras convenções, os princípios fundamentais das teorias físicas são convenções tanto quanto os axiomas da geometria. As teorias físicas seriam a busca de explicações, as mais simples possíveis, para os fenômenos da natureza, fundamentada em convenções cuidadosamente escolhidas. A importância dessa discussão epistemológica é apontar que, para Poincaré o tempo, e a igualdade entre duas medidas de tempo, são convenções convenientes.

Se agora supomos que vamos adotar uma outra maneira de medir o tempo, nem por isso as experiências sobre o qual estão fundadas as leis de Newton deixariam de conservar o mesmo sentido. Só que os enunciados das leis seriam diferentes, porque seriam traduzidos para uma outra linguagem; evidentemente seria muito menos simples [...] O tempo deve ser definido de tal modo que as equações da mecânica sejam tão simples quanto possível (POINCARÉ, 1995, p. 32).

Até mesmo as noções de sucessão e antecedência dos eventos são discutidas por Poincaré. Ele se pergunta: o que significa dizer que a explosão da supernova observada por Tycho Brahe (1572) aconteceu antes da descoberta da América por Cristóvão Colombo (1492). Para Poincaré, isso só pode ter um único significado caso se adote uma convenção. Sem entrar em maiores detalhes, Max Jammer diz que

Para comprovar essa afirmação, Poincaré analisa vários exemplos do uso das noções de simultaneidade, antecedência, ou sucessão, e mostra que elas envolvem explicitamente ou implicitamente determinados pressupostos

convencionais (JAMMER, 2006, p. 101, tradução nossa).

Poincaré também examina o argumento circular que tenta estabelecer a sucessão temporal a partir da relação de causa e efeito, e causa e efeito a partir da sucessão temporal. Somente com uma convenção é possível escapar disso. Mesmo que exista uma lei da natureza que estabeleça uma relação entre dois eventos *e1* e *e2*, como defendido por Kant anteriormente, é preciso lembrar que, segundo a tese convencionalista aqui exposta, essa lei não é a única forma consistente (verdadeira) de explicar os fenômenos. Para concluir,

A simultaneidade de dois eventos, ou a ordem de sua sucessão, a igualdade de duas durações, devem ser assim definidas para que o enunciado das leis naturais possa ser tão simples quanto possível. Em outras palavras, todas essas regras, todas estas definições são apenas fruto de um oportunismo do inconsciente (POINCARÉ, 1923 apud JAMMER, 2006, p. 101, tradução nossa).

Nessa discussão, essencialmente epistemológica, o objetivo de Poincaré foi colocar o significado objetivo do tempo e da simultaneidade em questão. Somente mais tarde, ao se debruçar sobre o problema da indetectabilidade do movimento relativo ao éter, é que Poincaré aborda a questão do estabelecimento operacional da simultaneidade não-local através de um método (convenção) de sincronização de relógios. É importante lembrar que o éter era uma consideração física importante para explicar a propagação das ondas luminosas no espaço sem matéria, e sua indetectabilidade o levou a formular o **Princípio da Relatividade**. Esse princípio diz que as leis físicas devem ser as mesmas para um observador fixo ou em movimento uniforme (em relação ao éter), de modo que não se tem como discernir qual o estado de movimento das coisas.

Em 1895, o físico Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) introduziu o conceito de *tempo local* para simplificar o tratamento matemático dos fenômenos eletromagnéticos em um referencial que se move com velocidade *v* em relação ao éter. Esse tempo difere do tempo “verdadeiro”, no referencial em repouso em relação ao éter. Poincaré percebeu que as leis da física obedeceriam ao seu **Princípio da**

**Relatividade** se elas fossem formuladas em termos de tempo local. Em outras palavras, as Equações de Maxwell se tornavam invariantes na transformação de referencial através da introdução do *tempo local*. Como a simultaneidade é uma questão de convenção, o procedimento operacional para sua obtenção também é. Assim sendo, Poincaré propôs o seguinte método de sincronização de relógios:

Imaginemos dois observadores que desejam acertar seus relógios por sinais ópticos; eles trocam sinais, mas como sabem que a transmissão da luz não é instantânea, tomam o cuidado de cruzá-los. Quando a estação B percebe o sinal da estação A, seu relógio não deve marcar a mesma hora que a da estação A no momento da emissão do sinal, mas essa hora aumentada de uma constante que representa a duração da transmissão. Suponhamos, por exemplo, que a estação A envie seu sinal quando seu relógio marca a hora zero, e que a estação B o perceba quando seu relógio marca a hora  $t$ . Os relógios estão acertados se o atraso igual a  $t$  representar a duração da transmissão, e, para verificá-lo, a estação B expede por sua vez um sinal quando seu relógio marca zero; a estação A deve então percebê-lo quando seu relógio marcar  $t$ . Então os relógios estão acertados. E de fato eles marcam a mesma hora no mesmo instante físico, mas com a condição de estarem fixas as duas estações. Caso contrário, a duração da transmissão não será a mesma nos dois sentidos, já que a estação A, por exemplo, vai ao encontro da perturbação óptica emanada de B, enquanto a estação B foge diante da perturbação emanada de A. Portanto, os relógios acertados desse modo não marcarão o tempo verdadeiro; marcarão o que podemos chamar de tempo local, de modo que um deles se atrasará em relação ao outro. Pouco importa, já que não temos nenhum meio de perceber isso. Todos os fenômenos que se produzirem em A, por exemplo, estarão atrasados, mas todos terão o mesmo atraso, e o observador não perceberá, já que seu relógio atrasa; assim, como manda o princípio da relatividade, ele não terá nenhum



meio de saber se está em repouso ou em movimento absoluto (POINCARÉ, 1995, p. 118-119).

Poincaré ainda discute a questão do uso de sinais não-luminosos, como o som, para definir processos alternativos de sincronização de relógios. Certamente, a comparação entre relógios acertados pelos diferentes processos resultaria em discrepâncias entre as medidas. No entanto, ele se pergunta “E são esses sinais inconcebíveis, se admitirmos com Laplace que a gravitação universal é transmitida um milhão de vezes mais rápida que a luz?” (POINCARÉ, 1913, p. 308, tradução nossa). A escolha dos sinais seria feita em favor da teoria física mais simples.

Por fim, Max Jammer se pergunta por que Poincaré não abandonou a distinção entre tempo local e tempo verdadeiro? Ele sugere a resposta dada por Stanley Goldberg, em seu estudo sobre Einstein e Poincaré.

Enquanto Poincaré pode muito bem ter usado uma posição convencionalista ao falar sobre a natureza da física, em seu próprio trabalho em física teórica, ele foi tudo menos um convencionalista (GOLDBERG, 1967, tradução nossa).

Foi Einstein, não Poincaré, quem abandonou a dualidade de tempos (verdadeiro e local), adotando uma definição operacional de simultaneidade que considera tanto o tempo verdadeiro quanto o tempo local a mesma coisa. No entanto, tal abandono não se deu porque Einstein estava sendo convencionalista, pelo contrário, Einstein adotou uma postura empirista na formulação da Relatividade Restrita, bastante influenciado por Mach. Poincaré publica, em 1908, *La dynamique de l'électron*, onde discute novamente o conceito de simultaneidade, ignorando completamente o artigo de Einstein de 1905. Entretanto Einstein é profundo conhecedor dos trabalhos de Poincaré.

Na transição para a Relatividade Restrita, novamente as discussões acerca de um conceito consistente de tempo e simultaneidade protagonizaram o período. A saída de Mach foi rejeitar os conceitos metafísicos (supérfluos) de Newton, resultando em um conceito destemporalizado de simultaneidade, enquanto Poincaré optou por entender tanto o tempo quando a simultaneidade como convenções

convenientes.

Do ponto de vista epistemológico, na visão convencionalista (e também instrumentalista) de Poincaré, as teorias científicas primeiro nascem de algum tipo de convenção conveniente sobre princípios, logo não derivam ingenuamente da experiência. Essa opção metodológica de Poincaré é fundamentalmente diferente da defendida pelos empiristas, e é contra-exemplo da concepção empírico-indutivista ingênua da ciência.

Somam-se às críticas das concepções temporais newtonianas, já comentadas anteriormente, as contribuições de Mach e Poincaré, apesar do reinado do paradigma newtoniano na Física. Reforçam o período não consensual e falta da linearidade sobre as concepções científicas de tempo e simultaneidade. A concepção de Poincaré é particularmente importante, pois sua definição operacional de simultaneidade é muito semelhante à de Einstein, que será citada posteriormente. Comparações diretas entre Newton e Einstein, sem o devido cuidado, podem resultar em saltos conceituais que não encontram respaldo na história. A questão sobre se isso pode prejudicar a compreensão da Relatividade Restrita, e em que medida isso ocorre, não é objeto de estudo desse trabalho.

A análise prévia dos livros didáticos universitários de física geral, mencionada na introdução dessa dissertação, indicou justamente que esse período (entre Newton e Einstein) é omitido pelos autores dessas obras, tornando-se um dos principais pontos conceituais e epistemológicos que será explorado na intervenção didática proposta adiante.

Com relação ao convencionalismo adotado por Poincaré, surgem dois aspectos epistemológicos interessantes: (1) a influência de um problema como motivação para discussões sobre o status das teorias científicas; e (2) o problema não ser da Física, mas da Matemática, uma área correlata. Tanto a concepção aproblemática e ahistórica quanto a analítica podem ser discutidas, e contestadas, com este episódio.

## 2.6 SIMULTANEIDADE NA RELATIVIDADE ESPECIAL

O ponto alto do presente estudo histórico sobre o conceito de simultaneidade é certamente a simultaneidade na Relatividade Restrita (especial). Após discutir dois milênios de concepções de tempo e simultaneidade, Max Jammer faz no sétimo capítulo de seu livro um exame extenso e minucioso de algumas definições de simultaneidade não-local feitas por Albert Einstein (1879-1955).

Para reconstruir o contexto do surgimento da Relatividade Restrita, Jammer (2006, p. 106) cita diversos fatos. O primeiro são as cartas de Einstein para sua noiva, Mileva Maric, entre 1898 e 1902, em que diz estar interessado na eletrodinâmica dos corpos e no problema da detectabilidade do éter. Em especial, uma carta de 1899, em que comenta a dificuldade de construir uma teoria da eletrodinâmica dos corpos por conta da impossibilidade da conciliação entre a constância da velocidade da luz e a adição de velocidades da mecânica. Cita também as correspondências de Einstein, dessa vez com o amigo e engenheiro Michele Besso, colega de trabalho no escritório de patentes em Berna, em que Einstein demonstra ter lido a obra de Poincaré, intitulada *Ciência e Hipótese*. Essa obra menciona o artigo *A medida do tempo*, que cita o método de sincronização de relógios de Poincaré, discutido anteriormente.

Ainda sobre a gênese da relatividade, Jammer (2006, p. 107) cita uma palestra proferida por Einstein na universidade de Kyoto (Japão) em 1922. Nessa palestra, ele diz que procurou Besso para discutir a contradição entre a constância da velocidade da luz e a adição de velocidades da mecânica. Após discutirem cada aspecto desse problema, Einstein foi para casa e encontrou a solução: realizou uma nova análise do conceito de tempo, e percebeu que ele não pode ser definido em termos absolutos, pois há uma relação inerente entre tempo e a velocidade de propagação de um sinal (luz). Após cinco semanas dessa conversa com Besso, estava pronta a primeira formulação da teoria da Relatividade Restrita.

Max Jammer se pergunta sobre a importância da ajuda de Besso na solução do problema, e para isso recorre ao estudo de Albrecht Fölsing. Nesse estudo, Fölsing (1997, p. 176–177) especula que Einstein e Besso tiveram acesso a uma cópia extraoficial da coletânea de ensaios *O Valor da Ciência*, de 1904, que contém o artigo *A medida do tempo*, onde Poincaré apresenta seu método de sincronização de relógios, citado anteriormente. Fölsing continua especulando que na conversa entre Einstein e Besso, citada por Einstein na palestra de Kyoto (1922),

Einstein e Besso descobriram alguns aspectos do procedimento de sincronização de Poincaré que podem ter escapado ao próprio Poincaré. Como seria - os dois amigos, até então céticos sobre o "tempo real", podem ter se perguntado - se o tempo definido pelo experimento de Poincaré não

fosse apenas um dispositivo matemático para o “tempo local” de Lorentz, mas na verdade, tudo que um físico poderia esperar de um conceito significativo? É certo que isso acarretará em um “tempo” diferente para cada sistema inercial, mas a constância da velocidade da luz para qualquer observador seria, nesse caso, inerente à definição de simultaneidade de Poincaré e não, como no caso de Lorentz, ser forçosamente provocada por um laborioso ajuste da teoria (FOLSING, 1997 apud JAMMER, 2006, p. 108, tradução nossa).

Outro estímulo pode ter vindo do trabalho que Einstein desenvolvia no escritório de patentes em Berna (Suíça), onde ele examinou vários dispositivos para sincronização de relógios de estações de trem e prédios públicos. Por exemplo, Jammer (2006, p. 122) cita duas patentes: (1) Instalação elétrica para transmissão do tempo, número 27555 (1903), de David Perret; (2) *Instalação com relógio central para a sincronização de relógios em locais diferentes*, número 29073 (1904), de L. Agostineli.

Ainda para corroborar o fato de que a revisão do conceito de tempo e simultaneidade foram fundamentais para Einstein formular a Relatividade Restrita, Jammer (2006, p. 108) argumenta que a primeira seção do famoso artigo *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento* (EINSTEIN, 1905) discute, justamente, uma definição da simultaneidade não-local.

Pela importância desse trabalho inaugural, Max Jammer inicia uma descrição da primeira seção do artigo, §1-*Definição da simultaneidade*, comentando principalmente o fato de que para Einstein “todas as proposições envolvendo tempo são sempre proposições sobre eventos simultâneos” (EINSTEIN, 1905, tradução nossa).

Se, por exemplo, eu digo “o trem chega aqui às 7 horas”, isso significa algo como, “a posição do ponteiro pequeno do meu relógio às 7 e a chegada do trem são eventos simultâneos” [...] é possível superar todas as dificuldades envolvidas na definição de “tempo” simplesmente substituindo a posição do ponteiro pequeno de meu relógio por “tempo” (EINSTEIN, 1923, tradução nossa).

É importante ressaltar que Einstein estava falando, nesse caso, da simultaneidade local, ou de eventos espacialmente contíguos. Para estender essa definição para eventos espacialmente distantes, ele propõe uma maneira de sincronizar relógios distantes, e será citada em extenso devido à sua importância histórica.

Se há um relógio no ponto A do espaço, então um observador localizado em A pode certificar o tempo dos eventos nas imediações de A, determinando a posição do ponteiro do relógio que é simultânea com esses eventos. Se existe também um relógio no ponto B - devemos adicionar, “um relógio com a mesma constituição do que está em A”, então o tempo dos eventos na imediata vizinhança de B pode também ser avaliado por um observador situado no B. Mas não é possível comparar o tempo de um evento em A com um em B, sem uma estipulação adicional; até agora só definimos um “tempo-A” e “tempo-B”, mas não um “tempo” comum para A e B. Este último pode agora ser determinado estabelecendo, por definição, que o “tempo” necessário para a luz viajar de A até B é igual ao “tempo” necessário para ela viajar de B até A. Suponha que um raio de luz parta de A para B no instante “tempo-A”  $t_a$ , é refletido de B para A no instante “tempo-B”  $t_b$ , e chega de volta a A no “tempo-A”  $t_a'$ . Os dois relógios estão sincronizados por definição se  $t_b - t_a = t_a' - t_b$ . (EINSTEIN, 1923, tradução nossa).

**Isso significa que a simultaneidade não-local ocorre se, e somente se, eventos distantes acontecem no mesmo instante t de relógios sincronizados junto aos eventos.** É importante esclarecer que o termo *tempo* foi utilizado em diferentes sentidos por Einstein: (1) “tempo-A” e “tempo-B” se referem às leituras feitas nos relógios; (2) o tempo necessário para a luz viajar de A até B significa um intervalo de tempo; (3) tempo comum entre A e B é chamado de coordenada temporal, o instante de tempo de um evento com relação a um sistema de coordenada espacial.

Einstein continua essa seção do artigo assumindo que a

sincronização proposta é livre de contradições e que valem as seguintes relações: (1) se o relógio A está sincronizado com B, então B está sincronizado com A; (2) se o relógio A está sincronizado com B, e por sua vez B está sincronizado com C, então A e C também estão sincronizados. Dessa forma, ele assume que a sincronização de relógios possui as propriedades: (1) Simétrica e (2) Transitiva. Assim sendo, é possível sincronizar uma infinidade de relógios, tantos quanto se queira, em um dado referencial inercial. Einstein termina essa sessão do artigo enunciando o postulado da luz:

“De acordo com a experiência, postula-se que a quantidade  $\frac{2AB}{ta' - ta} = c$  é uma constante universal (velocidade da luz no espaço vazio)” (EINSTEIN, 1923, tradução nossa).

Einstein inicia a segunda seção do artigo de 1905, § 2- *Sobre a relatividade do comprimento e do tempo*, enunciando os dois postulados da relatividade: (1) Princípio da relatividade; (2) Constância da luz. Em seguida ele prova, através de um experimento mental, que a simultaneidade é um conceito relativo. De forma sucinta, o argumento é o seguinte:

*Suponha um sistema de coordenadas S, em relação ao qual se move com velocidade uniforme v um bastão rígido de extremidades A e B (em repouso em um sistema de coordenadas S' que o acompanha). Em cada extremidade desse bastão há um observador com um relógio sincronizado com o sistema estacionário S. Suponha que um raio de luz saia de A, seja refletido em B, e retorne até A, de forma análoga à definição de simultaneidade já exposta. Considerando a velocidade da luz constante e a definição de simultaneidade, temos:*

$$tb - ta = \frac{AB}{c - v} \quad (1)$$

$$ta' - tb = \frac{AB}{c + v} \quad (2)$$

*Assim sendo, a sincronização  $tb - ta = ta' - tb$ , que vale no sistema S', não é satisfeita em S, caso v seja diferente de zero.*

**A simultaneidade não-local deixa de ser uma relação binária**

**para ser uma relação ternária, entre dois eventos mais um sistema de coordenadas num dado referencial inercial.** Além de demonstrar a relatividade da simultaneidade não-local, Einstein esclarece o significado de relatividade: é relativo ao sistema de coordenadas (inercial) adotado. Num aparente paradoxo, a relatividade da simultaneidade é fruto da invariância da velocidade da luz. Concluindo, a estratégia geral de Einstein foi transformar o problema da simultaneidade não-local num problema de sincronização de relógios, este, por sua vez, redutível à noção de simultaneidade local exemplificada anteriormente.

Retornando ao contexto da descoberta, pode-se argumentar que mesmo um fato do cotidiano de Einstein parece tê-lo inspirado, como sua caminhada diária até o escritório de patentes (em Berna). Nessa caminhada ele passava próximo ao relógio da famosa torre de Kramgasse, local que possui visada direta ao relógio da torre da igreja de Muri, no subúrbio de Berna. Recorre-se às palavras de Joseph Sauter, um engenheiro colega de Einstein no escritório de patentes, que disse

Einstein apontou a necessidade de uma nova definição de "sincronização" de dois relógios idênticos distantes um do outro: por sua definição, ele disse, suponha um dos relógios em uma torre em Berna e outro em uma torre em Muri (no antigo anexo aristocrático de Berna). No momento em que o relógio de Berna marca exatamente meio-dia, faz-se partir de Berna um sinal luminoso na direção de Muri; que chegará em Muri quando o relógio de Muri marcar o horário meio-dia +  $t$ ; então, refletindo o sinal na direção de Berna; se no momento em que chegar à Berna o relógio de Berna marcar meio-dia +  $2t$ , dizemos que os dois relógios estão sincronizados. (FLUCKINGER, 1974 apud JAMMER, 2006, p. 122, tradução nossa)

Esse raciocínio é muito parecido com a situação apresentada na definição de 1905, o que evidencia que Einstein estava imerso no problema da sincronização de relógios. Em seguida, Jammer (2006, p. 123-130) discute várias publicações de Einstein (1907b, 1910, 1911, 1914), em obras alemãs, que apresentam definições de simultaneidade alternativas, mas semelhantes. Pode-se encontrá-las em inglês na

monumental obra *The Collected Papers of Albert Einstein*, publicada pela Universidade de Princeton.

É muito importante esclarecer que não é discutido neste capítulo da obra de Jammer os motivos que levaram Einstein a reformular suas definições de simultaneidade, e consequentemente a própria formulação da relatividade. Tais motivos são abordados no capítulo oito, intitulado *A Recepção do Conceito Relativístico de Simultaneidade* (JAMMER, 2006, p. 148-170), e envolve críticas profundas à teoria da relatividade como um todo. Tal discussão, no entanto, foge dos objetivos dessa dissertação de mestrado.

Não obstante, abordar-se-á no estudo histórico desta dissertação a definição apresentada em 1917, no original alemão *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie—Gemeinverständlich*, disponível em inglês *Relativity: The Special and the General Theory - A Popular Exposition* (EINSTEIN, 1917 e 1920). Ela é importante por vários motivos: (1) é bastante diferente das anteriores, pois utiliza dois raios e um ponto médio; (2) é utilizada por muitos livros de introdução à Relatividade Restrita (fato discutido no próximo capítulo dessa dissertação) (3) é conceitualmente idêntica ao método de Santo Agostinho, comentado anteriormente.

Na definição do ponto médio, Einstein faz uso do seguinte experimento mental: dois raios atingem dois pontos, A e B, de uma linha de trem, distantes um do outro e simultaneamente. Então, Einstein se pergunta como verificar ao certo se os eventos foram simultâneos, pois o conceito de simultaneidade *não existe* até que se possa verificá-lo operacionalmente. Nesse contexto Einstein propõe o seguinte método:

A linha que conecta AB, considerada ao longo dos trilhos, deve ser medida e um observador colocado no ponto médio M da distância AB. Ao observador deve ser fornecido algum dispositivo (por exemplo dois espelhos inclinados a 90 graus) que permita observar visualmente ambos os locais A e B. Se o observador perceber os dois raios simultaneamente, eles são simultâneos. (EINSTEIN, 1917 apud JAMMER, 2006, p. 130, tradução nossa).

Esta definição não faz uso de relógios, mas ainda assim tem como estratégia geral a transformação de um problema de simultaneidade não-

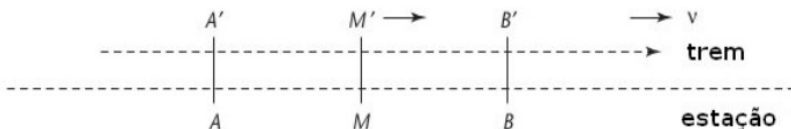


local num problema de simultaneidade local, pois os raios são observados no mesmo ponto do espaço (ponto médio). É um procedimento operacional idêntico ao método de Santo Agostinho, com a diferença de que as velocidades dos mensageiros (sinais luminosos) são garantidas de antemão como sendo iguais.

Com relação ao contexto da formulação da relatividade, Jammer (2006, p. 120) aponta que, provavelmente, Einstein já tinha em mente essa definição, mesmo antes de 1905. A primeira evidência é de que, no prefácio da obra de 1917, Einstein declara que apresentou sua teoria “na sequência em que foi realmente concebida” (EINSTEIN, 1917 apud JAMMER, 2006, p. 121, tradução nossa). Essa afirmação é corroborada pelo psicólogo Max Wertheimer (1880-1943 d.C.), que teve um relacionamento de amizade com Einstein desde 1916, em sua obra *Productive Thinking* (WERTHEIMER, 1945, p. 213–233), no capítulo dez, intitulado *Einstein: The Thinking that led to the Theory of Relativity*.

A relatividade da simultaneidade foi demonstrada através do seguinte experimento mental: um trem ( $S'$ ) atravessa uma estação de trem ( $S$ ) com velocidade constante ( $v$ ), conforme a figura abaixo:

Figura 3: Simultaneidade.



Fonte: adaptado de Jammer (2006, p. 132).

Dois raios (eventos) atingem respectivamente dois pontos A e B, e são simultâneos em relação ao referencial da estação de trem ( $S$ ). Esses dois eventos também serão simultâneos em relação ao trem ( $S'$ )? Dizer que os eventos em A e B são simultâneos com relação à estação de trem significa que os raios de luz, oriundos dos pontos A e B, chegam simultaneamente no ponto médio M.

Mas os eventos em A e B também correspondem às posições  $A'$  e  $B'$  no trem. Seja  $M'$  o ponto médio de AB do trem que se desloca. Quando os relâmpagos ocorrem (observados a partir da

estação), o ponto  $M'$  coincide naturalmente com o ponto  $M$ , mas movendo-se para a direita da figura com a mesma velocidade  $v$  do trem. Se um observador sentado na posição  $M'$  no trem não possuísse essa velocidade ( $v$ ), então ele iria ficar permanentemente em  $M$ , e os raios de luz emitidos pelo relâmpago em  $A$  e  $B$  teriam que alcançá-lo simultaneamente, ou seja, eles [raios] se encontrariam apenas onde ele [observador] está situado. Agora na realidade (considerado com referência a estação de trem), ele [observador em  $M'$ ] está se movendo ao encontro do feixe de luz vindo de  $B$ , enquanto ele também está se movendo à frente do feixe de luz vindo de  $A$ . Assim, o observador verá o feixe de luz emitido de  $B$  mais cedo do que ele vai ver o que foi emitido de  $A$ . Observadores que tomam o trem como referência devem, portanto, chegar à conclusão de que o relâmpago em  $B$  ocorreu mais cedo do que o relâmpago em  $A$ . Chegamos assim ao resultado importante: eventos que são simultâneos com relação à estação de trem não são simultâneos em relação ao trem, e vice-versa (relatividade da simultaneidade). Todo referencial (sistema de coordenadas) tem o seu tempo próprio; a menos que nos seja dito o corpo-referência para o qual se refere uma afirmação sobre o tempo, não há sentido em uma afirmação sobre o tempo de um evento (EINSTEIN, 1917 apud JAMMER, 2006, p. 132).

Independente da definição de simultaneidade adotada é importante ressaltar que “a relatividade da simultaneidade se tornou também o primeiro grande tema de disputa entre defensores e opositores da teoria da relatividade” (JAMMER, 2006, p.116). Desde 1905, e principalmente a partir de 1920, Einstein lidou com todo tipo de críticas e complementos à relatividade. O estudo histórico desta dissertação não irá se deter detalhadamente nas críticas e comentários que a relatividade recebeu por exigir um aprofundamento que foge aos objetivos desta dissertação. Entretanto, considera-se adequado expor ao menos dois episódios, pois tratam diretamente do conceito de simultaneidade: (1) erros de tradução e citação da definição de simultaneidade de 1905; (2)

discussões sobre a arbitrariedade (convencionalidade) na definição de simultaneidade. Este segundo ponto será sucintamente comentado a partir das discussões realizadas tanto neste capítulo que está sendo analisado quanto as realizadas no capítulo nove, intitulado *A Tese da Convencionalidade* (JAMMER, 2006, p. 171-191). O livro de Jammer dedica nove de seus quinze capítulos a simultaneidade no século XX, evidenciando uma riqueza histórico-conceitual-filosófica impressionante sobre esse conceito na Física Moderna. Qualquer aprofundamento exigiria um trabalho específico sobre o tema.

Em 1913, devido à grande procura no meio acadêmico pela nova teoria, foi publicada uma coletânea de artigos de Lorentz, Minkowski e Einstein (incluído o artigo de 1905), sob o título (original alemão) *Das Relativitätsprinzip*, que se tornou um *best seller* na época. Essa obra foi traduzida para o inglês em 1923, publicada como *The Principle of Relativity* (EINSTEIN, 1923), pelo matemático George B. Jeffery, e seu colega W. Perrett.

No processo de tradução do artigo de 1905, na parte referente à definição de simultaneidade, houve o seguinte equívoco: onde Einstein disse “Este último pode agora ser determinado estabelecendo, por definição...” (EINSTEIN, 1905 apud JAMMER, 2006, p. 110, tradução nossa), Jeffery e Perrett o traduziram como, “Este último não pode ser determinado a menos que se estabeleça, por definição...” (EINSTEIN, 1923). A diferença é que para Einstein sua definição é suficiente (mas não necessária), enquanto para Jeffery e Perrett, ela é necessária. Segundo Jammer, Einstein não se comprometeu sobre a possibilidade de existirem definições alternativas de simultaneidade, entretanto, de acordo com Perrett e Jeffery, ele [Einstein] negou tal possibilidade (JAMMER, 2006, p. 113, tradução nossa)

Jammer (2006, p. 113) também aponta o estudo de Scribner (1963), que argumenta que a tradução citada alterou o significado da definição original de 1905, dando a entender que a simultaneidade (e o tempo) só poderiam ser definidos através da propagação da luz. Os motivos que levaram Jeffery e Perrett a cometer esse equívoco

envolvem detalhes da língua alemã, e não serão aqui abordados. No entanto, Jeffery e Perrett não foram os únicos a cometer esse equívoco.

Um pouco antes, em 1921, o matemático alemão Hugo Dingler também criticou a definição de simultaneidade de Einstein, em seu livro *Physik und Hypothese* (DINGLER, 1921). Nessa obra, Dingler comenta (cita) a definição de 1905. Nas palavras de Dingler

O Senhor Einstein diz: até agora não definimos um tempo comum para A e B. Ele [Einstein] continua: Este último só pode ser definido decretando, por definição, que o “tempo” exigido pela luz para viajar de A até B é igual ao “tempo” para viajar de B até A. A expressão “só pode” prova que a definição natural de simultaneidade era, de fato, desconhecida pelo Senhor Einstein. Esta expressão é, no entanto, incorreta, não só com respeito à definição natural de simultaneidade, mas também na medida em que existem infinitas outras possibilidades de sua determinação (DINGLER, 1921 apud JAMMER, 2006, p. 114, tradução nossa).

Fica evidente que o equívoco de Dingler é o mesmo cometido por Jeffery e Parrett. Pode-se questionar se a citação errônea de Dingler (1921) tenha influenciado a tradução equivocada de Jeffery e Parrett (1923); no entanto, Jammer (2006, p. 115) argumenta que a obra de Dingler era desconhecida fora da Alemanha e que a tradução de Jeffery e Perrett não cometeu qualquer outro equívoco de tradução. Por último, segundo Jammer (2006, p. 115), é muito provável que tanto a citação errônea de Dingler quanto o erro de tradução de Jeffery e Parrett tenham sido causados por um descuido não intencional da interpretação das palavras de Einstein. **A aceitação da relatividade esbarra não só no seu caráter revolucionário, mas também na interpretação correta das palavras de Einstein.**

Em maio de 1921, Einstein proferiu uma sequência de pequenas palestras em Princeton, que resultaram na obra *The Meaning of Relativity* (EINSTEIN, 1921), onde ele se defende das acusações de dar um papel excessivo para a propagação da luz na construção da relatividade.

A teoria da relatividade é muitas vezes criticada por fazer desempenhar, sem justificação, um papel teórico central à propagação da luz, baseando o conceito de tempo sobre a lei da propagação da luz. A resposta a esta objeção é a seguinte: para dar significado físico ao conceito de tempo, algum processo tem que ser utilizado para permitir estabelecer relações entre lugares diferentes. É indiferente o processo escolhido, mas o que a teoria exige é que se escolha um sobre o qual tenhamos dados seguros. É a este requisito que satisfaz a propagação da luz no vazio, num mais alto nível do que qualquer outro processo físico, graças às investigações de Maxwell e H. A. Lorentz (EINSTEIN, 1984, p. 40-41).

Nesta obra de 1921 também aparece a última definição de simultaneidade de Einstein, e que nada trouxe de novo sobre este conceito.

Outra questão histórica importante, e que será retomada no capítulo 3 desta dissertação, é que em 1905 vários fenômenos eram tidos com velocidade de propagação supraluminal. Por exemplo, os fenômenos gravitacionais, de propagação instantânea, e utilizado por Kant em sua definição de simultaneidade. Outro exemplo é apontado pelo historiador da ciência Roberto Martins:

A velocidade da luz em meios transparentes (ar, água, vidro) é menor do que no vácuo. No entanto, ocorre que a propagação da luz colorida (por exemplo vermelha) em um material transparente também colorido e que absorve fortemente aquela cor (vermelha, no caso), pode ocorrer com uma velocidade maior do que a luz no vácuo (MARTINS, 1986).

Na formulação original da Relatividade Restrita (EINSTEIN, 1905), não se reconhece a velocidade da luz como o limite das interações da natureza. Na verdade é dito que

Para  $v=c$  todos os objetos que se movem, vistos de um referencial estacionário, encolhem para uma

figura plana. Para velocidades maiores que a luz nossas deliberações [discussões do artigo] tornam-se sem sentido; devemos, no entanto, considerar o que se segue: de que a velocidade da luz na nossa teoria desempenha o papel físico de uma velocidade infinitamente grande. (EINSTEIN, 1923, tradução nossa).

Inicialmente, Einstein prefere não tratar do caso de sinais supraluminais, mas eles existem e são de conhecimento geral da comunidade científica. Também é possível notar que **os postulados da Relatividade Restrita, como propostos originalmente por Einstein, não proíbem diretamente sinais supraluminais**. Mas qual o problema da existência destes sinais? Para entender essa questão, será necessário uma breve discussão sobre o **Princípio da Antecedência da Causa**.

Esse princípio diz, resumidamente, que *a causa antecede o efeito*. Ele remonta a Aristóteles, que em sua teoria causal propõe que a causa é simultânea com seu efeito (localmente), ou posterior (a distância), mas nunca anterior. Leibniz sugere utilizar-se deste princípio na criação de uma teoria causal de ordem temporal, como ele mesmo o fez. Mas é com Kant, em sua teoria do tempo, discutida anteriormente, que este princípio se populariza, pois ele o utiliza como um critério de objetividade temporal: um evento *e1* é dito preceder *e2* se existe uma lei da natureza que relaciona estes dois eventos, onde *e2* é um efeito de *e1*.

Interações físicas supraluminais resultam na violação deste princípio, por exemplo:

Suponhamos agora, como hipótese de trabalho, que algum tipo de influência física possa propagar-se com velocidade maior do que a da luz [no vácuo]. Suponhamos que o evento *e1* é o apertar de um botão em um certo ponto e que, ao apertar-se esse botão, é enviado pelo espaço um sinal com velocidade maior do que a luz, que vai ser captado em um ponto distante e produzir a detonação de uma bomba nesse ponto. A detonação da bomba é o acontecimento *e2*. Ora, como essa influência é, por hipótese, mais rápida que a luz, o acontecimento *e2* ocorre antes que um sinal luminoso emitido em *e1* possa chegar ao local da bomba. Assim sendo, como já foi

explicado, haverá sistemas de referência para os quais o acontecimento  $e_2$  ocorreu antes que o acontecimento  $e_1$ , ou seja, a bomba explodiu antes que o botão fosse apertado; o efeito acontece antes da causa (MARTINS, 1986).

Esse problema suscita três alternativas: (1) não vale o Princípio da Antecedência da Causa; (2) a velocidade limite de qualquer interação da natureza é a velocidade da luz no vácuo ( $C$ ) e (3) a recém criada Relatividade Restrita está errada. Segundo Martins (1986), Einstein (1907a) optou pela segunda alternativa, e incluiu, adicionalmente aos postulados, que nenhum sinal pode se propagar mais rápido que  $C$ , sem sequer discutir as outras alternativas. Como sinais supraluminais são de conhecimento geral, houve um intenso trabalho (e apoio) de vários físicos, como Arnold Sommerfeld, para mostrar que esses sinais supraluminais não são capazes de transmitir informação, portanto não violam o Princípio da Antecedência da Causa. Aproximadamente em 1920 a comunidade científica em geral já estava convencida do limite  $C$  para interações da natureza. Esse ponto será retomado no próximo capítulo dessa dissertação, na análise dos livros didáticos. A lição que se pode tirar de imediato é que, a partir de 1907, a Relatividade Restrita, e a definição de simultaneidade, tomam um significado muito mais profundo do que o próprio Einstein imaginou.

Nos primeiros anos após o artigo de 1905, a teoria de Einstein foi tida como uma modificação da eletrodinâmica de Lorentz (1904), que era a teoria prevalecente. Filósofos em geral também não se envolveram com os fundamentos da relatividade antes da década de 1920. Einstein, e suas ideias, só ganharam notoriedade após o eclipse de 1919, que testou uma previsão da Relatividade Geral (deflexão da luz pela gravidade).

No entanto, já na obra de 1917, Einstein complementa a definição de simultaneidade com o esclarecimento adicional de que a velocidade de propagação da luz, nos trajetos  $A \rightarrow M$  e  $B \rightarrow M$  são iguais. Não obstante, Einstein chama a atenção de que o uso dessa suposição (constância da luz) só pode ser feito se já se dispuser de uma maneira de medir o tempo, levando a uma definição circular. Após o próprio Einstein antecipar essa crítica, ele responde que

esta definição pode ser mantida, porque na realidade ela não assume absolutamente nada sobre a luz. Existe apenas uma exigência a ser

feita para uma definição de simultaneidade, que é: que em cada caso concreto, ela deve fornecer-nos uma decisão empírica sobre se a concepção definida foi ou não satisfeita. Que essa definição satisfaz a essa demanda é indiscutível. Que a luz requer o mesmo tempo para percorrer o caminho  $A \rightarrow B$  e também  $B \rightarrow A$ , não é na realidade nem uma suposição, nem uma hipótese, sobre a natureza física da luz, mas uma estipulação que eu faço por livre arbítrio, a fim de chegar a uma definição de simultaneidade (EINSTEIN, 1917 apud JAMMER, 2006, p. 131, tradução nossa).

Esse comentário adicional, que pode ser usado para justificar todas as definições anteriores de simultaneidade, é certamente uma notável antecipação às críticas que Einstein enfrentou, principalmente após a década de 1920. Um dos maiores críticos e comentadores de Einstein foi o filósofo alemão Hans Reichenbach, que publicou uma série de obras dedicadas à análise do conceito de espaço e tempo na relatividade. Na primeira, Reichenbach (1920, 1965) diz que

há uma certa arbitrariedade em qualquer sistema de coordenada temporal. Esta arbitrariedade é reduzida ao mínimo se a velocidade de propagação do processo, cuja necessidade na definição de sincronismo tem sido defendida por Einstein, é assumida constante, independente da direção, e igual para todos os sistemas de coordenadas (REICHENBACH, 1965 apud JAMMER, 2006, p. 174, tradução nossa).

Recordando a definição de 1905, Jammer (2006, p. 136) salienta que Einstein usou o termo estipulação quando disse “não é possível comparar o tempo de um evento em A com um em B, sem uma estipulação adicional” (EINSTEIN, 1905 apud JAMMER, 2006, p. 110, tradução nossa), que é “o tempo” necessário para a luz a viajar de A até B é igual ao “tempo” necessário para viajar de B até A” (EINSTEIN, 1905, tradução nossa). É importante lembrar que o sentido das palavras de Einstein, nessa definição, colocam a constância da velocidade da luz como condição suficiente, mas não necessária, como já foi discutido. Já na definição de 1911, Einstein parece ter aberto a porta para o



argumento apresentado por Reichenbach.

Mas se é impossível, em princípio, medir uma velocidade, em especial a velocidade da luz, sem recorrer à estipulações arbitrárias, então estamos justificados em fazer estipulações arbitrárias em relação à velocidade da luz. Vamos agora estipular que a velocidade de propagação da luz no vácuo, partindo de algum ponto A para o ponto B é a mesma que de B para A. (EINSTEIN, 1911 apud JAMMER, 2006, p. 127, tradução nossa).

Um pouco depois, Reichenbach (1922) diz que seria errôneo acreditar que a definição de simultaneidade apresentada por Einstein seja mais correta do que outras definições, entretanto, admite que a definição escolhida é bastante vantajosa. Uma das vantagens é o fato de que ela é transitiva, ou seja, se o evento A é simultâneo com B, e B é simultâneo com C, então A e C também são simultâneos.

Aprofundando-se no tema, Reichenbach (1924) formula uma axiomatização da Relatividade Restrita, argumentando pela convencionalidade da definição de simultaneidade, mais conhecida como *Tese da Convencionalidade*. Discutindo o papel dos axiomas, Reichenbach argumenta que os axiomas da Física

não só devem satisfazer as exigências lógicas de consistência, independência, unicidade e completude, como os axiomas da matemática, mas, em contraste com os últimos, eles não devem ser arbitrários, mas verdadeiros, pois eles "contém toda a teoria implicitamente". Por outro lado, "as definições são arbitrárias, pois elas não são nem verdadeiras nem falsas" (JAMMER, 2006, p. 175, tradução nossa).

Uma nota muito importante: Reichenbach fundou, junto com outros filósofos, o Círculo de Berlim e a escola conhecida como empirismo lógico. Ela é muito semelhante ao positivismo lógico, mas guarda algumas diferenças em alguns tópicos, como o aqui discutido convencionalismo. Até aquele momento, os positivistas lógicos (e Reichenbach) acreditavam na completude da matemática, e o *Programa de Hilbert* da axiomatização da matemática estava em curso. Por isso,

Reichenbach citou a completude dos axiomas da matemática, mas que foi demonstrada impossível pelos teoremas da incompletude da aritmética de Kurt Gödel, em 1931.

A definição de simultaneidade de Einstein é, para a filosofia de Reichenbach, o que se chama de *Definição Coordenativa*. Diferente das definições conceituais, onde se esclarece um conceito por meio de outros conceitos, a definição coordenativa é o meio pelo qual os termos primitivos, postulados, leis e princípios de uma teoria adquirem significado empírico com sentenças observacionais. As definições coordenativas são também chamadas de regras de correspondência ou definições operacionais; são arbitrárias, portanto e a noção de verdadeiro ou falso não é aplicável.

Por outro lado, pode-se argumentar que a constância da velocidade da luz não é arbitrária, mas uma suposição sobre a isotropia do espaço com relação à velocidade da luz. De fato, Einstein disse que “A suposição de que esta velocidade depende da direção “no espaço” é, em si, improvável” (EINSTEIN, 1917). E ainda, como já citado do artigo de 1905, Einstein disse que

De acordo com a experiência, postula-se que a quantidade  $\frac{2AB}{ta' - ta} = c$  é uma constante universal (velocidade da luz no espaço vazio) (EINSTEIN, 1905 apud JAMMER, 2006, p. 116, tradução nossa).

Einstein provavelmente estava se referindo à experiência de Michelson–Morley. No entanto, em uma carta de 1924, endereçada para André Merz, Einstein diz que “a teoria da relatividade envolve convenções, e entre elas está o conceito de simultaneidade” (JAMMER, 2006, p. 136, tradução nossa). Max Jammer conclui que, com relação ao conceito de simultaneidade, “Einstein pode ser classificado como um convencionalista, mesmo que às vezes tenha feito declarações não totalmente consistentes com a posição” (JAMMER, 2006, p. 137, tradução nossa).

O físico russo Ignatowski (1910) derivou as transformações de Lorentz usando teoria de grupos, o princípio da relatividade, a isotropia e homogeneidade do espaço. Não fez uso do postulado da luz. Um ano depois, Frank e Rothe (1911) fizeram o mesmo, utilizando apenas dois postulados (sem uso da luz). Entretanto, eles não “foram capazes de

identificar a velocidade invariável contida nas transformações resultantes com a velocidade da luz” (JAMMER, 2006, p. 146, tradução nossa). Ao longo do século XX, foram elaboradas várias outras formulações da relatividade, sem o uso do postulado da luz ou qualquer referência à simultaneidade, tais como as de Mermin (1984), Kauffman (1985), Field (2001) e Friedman e Gofman (2002).

Essa variedade de formulações questiona a necessidade, e a importância, da definição de simultaneidade para a construção da relatividade, a tal ponto que Norton (2004) sugere que o procedimento de sincronização de relógios, proposto por Einstein em 1905, não desempenhou papel fundamental na formulação da relatividade, quando comparado aos anos anteriores em que Einstein passou refletindo sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento.

Com relação à gênese da relatividade, é evidente que Einstein não a elaborou como uma mera resposta à não detecção do éter no experimento de Michelson e Morley, apesar deste experimento ser importante para Einstein supor que a velocidade da luz no vácuo é uma constante universal. A noção de ciência que se constrói fundamentalmente a partir dos fatos experimentais e da indução não encontra suporte neste episódio histórico.

Tampouco a motivação principal de Einstein foi alguma insatisfação com os conceitos de espaço e tempo. O problema fundamental foi a incompatibilidade entre a Mecânica Newtoniana e o eletromagnetismo de Maxwell, mais especificamente, a impossibilidade de conciliar a transformação de Galileu com a constância da velocidade da luz para todos os referenciais, que por sua vez era uma convicção teórica de Einstein. É importante frisar que para Poincaré, o princípio da relatividade decorria dos resultados experimentais negativos de detecção do éter, podendo ser revisto à luz de novos fatos. A elaboração da Relatividade Restrita envolve a resolução de um problema entre teorias físicas, naquilo que é chamado por Laudan (2011, p. 71) de *Problema Conceitual Externo*. Além disso, a necessidade de considerar que a velocidade máxima das interações na natureza é a da luz no vácuo, a fim de manter a recém criada Relatividade Restrita consistente com o Princípio da Antecedência da Causa, também foi um problema dessa mesma natureza, resolvido por Einstein e colaboradores.

Segundo a interpretação de Jammer (2006, p. 108-110), o passo final de Einstein, que teve efeito catalisador na elaboração da Relatividade Restrita, foi a revisão dos conceitos de espaço, tempo e simultaneidade. Como foi extensamente comentado anteriormente, as

definições de simultaneidade de Einstein foram duramente acusadas de arbitrariedade e circularidade. Mais uma vez isso exigiu de Einstein e colaboradores a defesa da consistência da teoria. Esse é essencialmente um *Problema Conceitual Interno*, de mesma natureza do resolvido pelos escolásticos na Idade Média, quando trataram da unicidade do tempo. Assim sendo, todas esses fatores (problemas) indicam que a gênese da Relatividade Restrita pode contribuir fortemente para minar a visão aproblemática e ahistórica da ciência.

A resposta de Einstein foi a reelaboração da mecânica, fundamentada em pressupostos radicalmente diferentes dos anteriores, principalmente os conceitos de espaço, tempo e simultaneidade. Ele realizou uma ruptura com o conhecimento antes estabelecido, sugerindo uma evolução não linear do conhecimento, mais tarde chamada de Revolução Científica, por Thomas Kuhn (1971, 1998).

O caminho trilhado por Einstein, que incluiu um grande período de imersão em questões teóricas de seu tempo, considerações empíricas, criatividade, coragem e um bom tempo desenvolvendo a teoria após sua primeira publicação em 1905, ilustram que não há um método rígido, algorítmico, para construir o conhecimento científico. As numerosas contribuições que Einstein recebeu, tanto críticas quanto de apoio, também indicam que esta teoria não é obra exclusiva de um gênio, mas de uma comunidade científica num período de efervescência de ideias, contrariando a visão elitista da ciência.

A resolução de uma incompatibilidade entre diferentes teorias da Física mostra que os cientistas nem sempre trabalham em problemas cada vez mais especializados, mas, se necessário for, podem realizar unificações entre teorias ao identificarem e resolverem *problemas conceituais externos*. A concepção exclusivamente analítica encontra um excelente contra-exemplo neste episódio.

Procurou-se evidenciar que o desenvolvimento do conceito de simultaneidade, no contexto da Relatividade Restrita, contém substrato histórico para reflexões e discussões acerca das visões deformadas elencadas por Gil-Perez *et al.* (2001). Mas é preciso fazer uma ressalva: mesmo que se tome as visões deformadas como algo que se deve evitar (consenso do tipo negativo), é provável que existam episódios históricos diversos que sugiram outro consenso epistemológico igualmente relevante.

Além do debate epistemológico, a compreensão conceitual dos fundamentos da Relatividade Restrita também pode ser ampliada, como se verá, mais especificamente, no próximo capítulo.

### 3 A SIMULTANEIDADE NOS LIVROS DE FÍSICA BÁSICA DE MECÂNICA E RELATIVIDADE RESTRITA

O aluno universitário tem o primeiro contato com os fundamentos da Física através dos cursos de física básica, que exercem influência fundamental no restante da formação acadêmica. O físico brasileiro Moysés Nussenzveig comenta que

O curso de física básica é o mais importante dos cursos de física ministrados na universidade. Para a formação de engenheiros, químicos, matemáticos, geólogos e outros profissionais, representa possivelmente o único contato que terão com os conceitos básicos da física e com o modo de pensar e abordar problemas dos físicos (NUSENZVEIG, 2002).

Na evolução histórica do conceito de simultaneidade, exposto no capítulo anterior desta dissertação, verifica-se que esse conceito **está intrinsecamente ligado ao conceito de tempo** e que possui bastante relevância em vários momentos do desenvolvimento da Física. Portanto, seria desejável que esse conceito fosse abordado nos cursos de física geral, sobretudo naqueles que tratam dos fundamentos da cinemática e da Mecânica Newtoniana.

O objetivo desse capítulo é analisar os aspectos conceituais e epistemológicos referentes aos conceitos de simultaneidade (e de tempo, se necessário), nos livros de física geral universitários, especificamente os tópicos nos Cinemática e Mecânica Newtoniana, chamados a partir de agora de mecânica pré-relativística, e introdução à Relatividade Restrita. Tal estudo será feito utilizando a teoria da Transposição Didática (CHEVALLARD, 1991) como instrumento de análise.

#### 3.1 A TEORIA DA TRANSPosição DIDÁTICA

O conceito de transposição didática apareceu, pela primeira, vez na obra *Les temps des études*, de Michel Verret (1975). Ao longo da década de oitenta, o didata francês Yves Chevallard desenvolveu a teoria da transposição didática, inserindo o conceito original de Verret no contexto da didática da matemática. Essa teoria foi publicada no início

da década de noventa (CHEVALLARD, 1991), e é composta de duas seções, desenvolvidas na década de oitenta, mais um pós-fácio, em que Chevallard analisa as transformações que a noção matemática de distância sofreu, e também responde às críticas que recebeu de outros didatas.

Uma das justificativas de Chevallard para o desenvolvimento dessa teoria é o fato de que, até o final da década de 70, muitos esforços haviam sido feitos para estudar a relação entre professor e aluno, e pouco se discutiu o saber, essencial para a compreensão do sistema didático. O saber é classificado por Chevallard em três categorias:

- **Saber sábio:** pertencente à esfera científica, é produzido e socializado no meio acadêmico, na forma de artigos em revistas especializadas e eventos científicos.
- **Saber a ensinar:** compõe o saber disposto nos livros didáticos e manuais científicos, é, ainda hoje, a fonte principal de conhecimento a que o aluno recorre no sistema educacional.
- **Saber ensinado:** é o saber efetivamente trabalhado no contexto da sala de aula. Baseia-se no saber a ensinar, mas recebe influência dos objetivos pedagógicos do professor e de outras instâncias, como o contexto cultural.

É justamente na passagem do saber sábio ao saber a ensinar que reside o conceito principal que dá nome à teoria da transposição didática.

A passagem de um conteúdo de saber preciso a uma versão didática deste objeto de saber pode ser chamada justamente de “transposição didática *stricto sensu*”. Mas o estudo científico do processo de transposição didática (que é uma dimensão fundamental da didática das matemáticas) supõe a consideração da transposição didática *lato sensu*, representada pelo esquema → objeto do saber → objeto a ensinar → objeto de ensino (CHEVALLARD, 1991, p. 39).

A análise dos livros didáticos implementada neste capítulo está relacionada à transposição didática *lato sensu*. Segundo Chevallard (1991, p. 15), essa passagem do saber sábio ao saber a ensinar provoca,

necessariamente, deformações no saber, para que este se torne um saber ensinado. Essas deformações podem resultar na criação de novos saberes (objetos didáticos), ou na substituição patológica dos mesmos.

Para avaliar os efeitos, bons ou nocivos, de uma transposição didática (*strictu sensu*), Chevallard desenvolve o conceito de vigilância epistemológica. O didata (não o professor) realiza uma *vigilância epistemológica*, analisando cientificamente a adequação do saber (transformação do saber) frente às expectativas do sistema de ensino.

O motivo pelo qual um saber deve ser transformado está no fato de que em cada esfera, científica ou educacional, eles possuem funções distintas. Dentro do sistema didático, o saber a ensinar serve, em primeiro lugar, às demandas sociais, ou seja, tem função social. Mas quem determina quais são as demandas sociais, e portanto quais saberes devem ser ensinados são os órgãos governamentais, movimentos sociais, especialistas em educação, legisladores, autores de livros didáticos e os cientistas. Todos esses atores, com diferentes expectativas para o EC, necessitam entrar em acordo sobre quais são as necessidades sociais, sob um determinado contexto, e que conhecimentos devem compor o currículo escolar. O conjunto desses atores é chamado de **noosfera**. A etapa da transposição didática vinculada a este domínio é denominada transposição didática externa. Em princípio, professores e alunos não compõem a noosfera.

Mas como um saber sábio se transforma em um saber a ensinar, a fim de atingir alguma demanda social? A resposta de Chevallard, muito inspirada pela obra de Verret, é

Uma transmissão escolar burocrática supõe, quanto ao saber:

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

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

3o - a programação das aprendizagens e dos controles seguidos de seqüências racionais, que

permitam uma aquisição progressiva das especialidades isto é, a programabilidade da aquisição do saber.

Ela supõe quanto à transmissão:

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

2o - o controle regulado das aprendizagens dos saberes, seguido de procedimentos de verificação que autorizam a certificação das especialidades, isto é, o controle social de aprendizagem (VERRET, 1975 apud CHEVALLARD, 1991).

A transposição do saber sábio para o sistema escolar, obedecendo as demandas sociais levantadas pela noosfera, implica na produção dos materiais didáticos (textualização do saber). Nesta textualização, ocorre cada um dos processos acima descritos: dessincretização, despersonalização, programação da aquisição do saber, publicidade do saber e o controle social da aprendizagem.

O processo de despersonalização é necessário para dar maior publicidade ao saber, conferindo-lhe um certo caráter genérico, permitindo que o saber seja utilizado por terceiros. Ele já começa desde a origem da própria publicidade do saber sábio na esfera acadêmica, através de normas específicas dos periódicos científicos.

Já o processo de dessincretização ocorre durante a textualização do saber porque é necessária a “delimitação de saberes parciais, cada um se exprimindo em seu discurso autônomo (fictício)” (CHEVALLARD, 1991, p. 58-59), para que seja possível apresentar o saber de maneira ensinável dentro do sistema de ensino. A dessincretização resulta, por exemplo, na retirada de um conceito do contexto histórico em que ele foi criado e transporte até uma outra situação diferente, no espaço e no tempo. Esse particionamento do saber torna possível sua reorganização, constituindo um novo saber, o saber a ensinar.

A textualização do saber ainda implica em outro fenômeno, que não é mencionado diretamente por Chevallard (1991), mas que decorre dos processos de despersonalização e dessincretização: a descontextualização. Trata-se da exclusão, na textualização do saber, dos



problemas e dúvidas que os cientistas viveram na elaboração do conhecimento. Em outras palavras, suprimem-se as perguntas ficando-se, essencialmente, com as respostas.

O saber que a transposição didática produz será então um saber exilado de suas origens e recortado de sua produção histórica na esfera do saber sábio; legitimando-se, como saber ensinado, por ser atemporal e não local, e não precisando se legitimar recorrendo à autoridade de um produtor, qualquer seja ele. [...] O saber ensinado supõe um processo de naturalização, que lhe confere a evidência incontestável das coisas naturais (CHEVALLARD, 1991, p. 17).

A dessincretização está relacionada com os conceitos, e a descontextualização com a sua produção histórica. São esses dois processos que são importantes de serem analisados nos livros didáticos de física geral, pois estão intimamente ligados ao objetivo deste trabalho de mestrado, que é realizar discussões conceituais e epistemológicas acerca do desenvolvimento do conceito de simultaneidade.

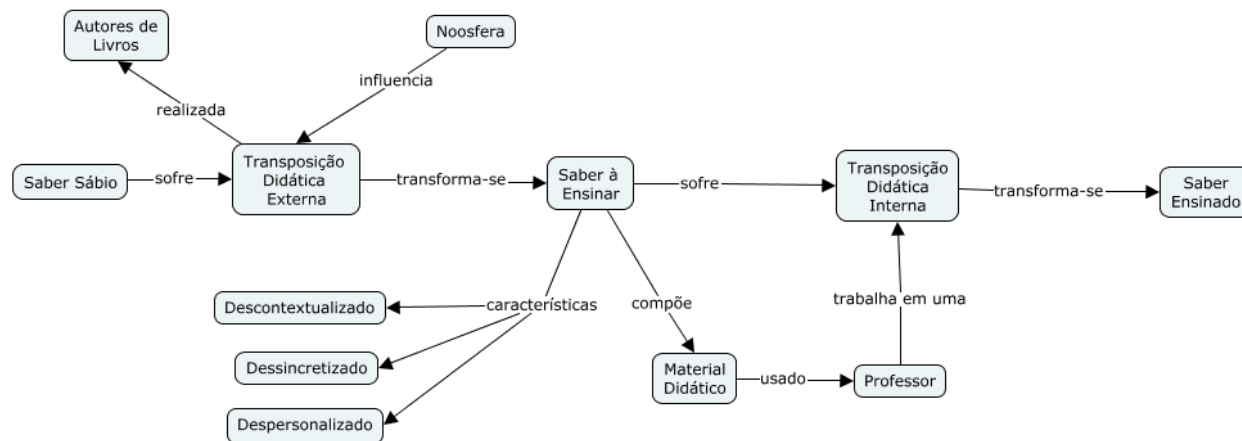
A dinâmica da transformação pode ser resumida da seguinte maneira: a noosfera identifica e determina o conteúdo que deve compor o saber escolar, os autores de livros e didatas textualizam o saber (transposição didática externa), e o saber resultante está apto a ser trabalhado pelo professor dentro do ambiente escolar. Mas este saber é essencialmente despersonalizado, dessincretizado e descontextualizado.

Mas qual o papel do professor em toda essa dinâmica? O professor não compõe a noosfera, portanto não **realiza** uma transposição didática externa. Entretanto, **ele trabalha em uma transposição interna**, pois “sob a aparência de uma escolha teórica, o professor não escolhe, pois ele não tem possibilidades de escolha” (CHEVALLARD, 1991, p. 19). Isso porque o fenômeno da transposição didática inicia-se muito antes de chegar ao professor, e certamente faz parte da própria formação acadêmica deste, pois também atinge os livros universitários. Tal “ignorância” induz o professor a acreditar na pretensa cientificidade do saber a ensinar, conferindo legitimidade ao saber escolar.

O professor, ao trabalhar em uma transposição didática, participa dela ativamente. Se não atua na elaboração dos currículos escolares e do livro didático, quando a porta da sala de aula se fecha a situação se

inverte. Ao professor é permitido, e desejável, uma criatividade didática, visando adaptar à realidade local os conteúdos, influenciado pelas expectativas do sistema de ensino e da sociedade como um todo. Sua importância é inestimável. Neste momento, ocorre o fenômeno da transposição didática interna, em que os saberes dispostos no livro didático sofrem nova adaptação e incluem contribuições pontuais do professor. O professor é o elo entre o saber a ensinar e o saber ensinado, que só ocorre efetivamente na sala de aula.

Figura 4: Transposição Didática.



Fonte: elaborada pelo autor.

A Transposição Didática enfrentou críticas da comunidade de pesquisadores em educação em ciências. Considerando os propósitos deste trabalho, torna-se imperativo discutir duas dessas críticas: (1) a robustez da teoria; (2) a extensão desta teoria além do ensino da Matemática.

Quanto ao primeiro ponto, Caillot (1996) afirma que, se a intenção de Chevallard é mesmo propor uma teoria, então ela deve ser capaz de dar uma explicação global sobre a transposição didática para todos os saberes escolares. Mas Caillot apresenta trabalhos que contestam a teoria de Chevallard para a área de línguas. No âmbito das Ciências Humanas, como a História e Geografia, Audigier, Crémieux e Tutiaux-Guillon (1994) argumentam que neste caso o saber é fruto de diversas interpretações distintas. No contexto da Física, Martinand (apud CAILLOT, 1996) discorda que a origem do processo de transposição didática seja apenas o saber sábio, e apresenta outros conhecimentos igualmente importantes, denominados *práticas sociais de referência*.

No contexto nacional, Marandino (2004) discute a transposição do saber sábio (da biologia) no contexto de um museu de Ciências. Ela conclui que outros saberes, não apenas o conhecimento científico (saber sábio), participam do processo de transposição. A escolha do que, e como, expor toma emprestado conhecimentos de outras áreas. Ricardo e Zylbersztajn (2007) argumentam que para a formação de competências, de acordo com os novos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN), o processo de ensino e aprendizagem deve se estender além da escola. O indivíduo teria de se relacionar com o saber, mas fora do sistema de ensino formal, da maneira autônoma. Nesse caso, as práticas sociais de referência são importantes para a continuidade desse relacionamento, que ocorre sem a presença de um professor.

Quanto ao segundo ponto, é consenso que o conhecimento científico sofre transformações da sua origem até a sua chegada no sistema de ensino formal. Nesse sentido, a transposição didática pode ser entendida de forma mais ampla, como esse fenômeno de adaptação do saber. Mesmo com as críticas sofridas pela teoria de Chevallard, os conceitos principais estabelecem bases sólidas para o entendimento geral desse fenômeno. Pode-se argumentar que o ensino de outras áreas científicas, como a Física e Química, pode ser analisado pela teoria original de Chevallard (1991), **desde que essa teoria não seja tomada acriticamente**. Sua extensão para outras áreas deve sempre ser feita de maneira cuidadosa e criteriosa.

Com relação aos materiais didáticos, Alves-Filho (2000)

argumenta que o saber, depois de sofrer os processos de despersonalização, dessincretização e descontextualização, adquire uma “configuração *dogmática, fechada, ordenada, cumulativa* e, de certa forma, *linearizada*” (ALVES-FILHO, 2000, p. 226, grifo do autor). A consequência deste tipo de característica dos materiais é a possibilidade de propagar a visão **acumulativa de crescimento linear**, elencada por Gil-Pérez et. al. (2001) e discutida no primeiro capítulo dessa dissertação. Mas será esta a única visão deformada que resulta do processo de transformação do saber?

Por exemplo, ao retirar as dúvidas e questionamentos dos cientistas em um contexto histórico, o aprendiz fica sujeito a respostas sem perguntas, e provavelmente deixará de compreender o papel dos problemas, bem como da formulação e análise dos experimentos. Pode ocorrer a propagação das imagens **empírico-indutivista e atórica** ou da **aprobemática e ahistórica**.

Os problemas que compõe o contexto de uma época podem não pertencer apenas ao âmbito científico, mas podem influenciar outras atividades sociais, por exemplo a econômica. A descontextualização também pode suscitar a imagem **socialmente neutra**.

Se as crises e rupturas, que ocorrem no desenvolvimento científico, são omitidas pelo processo de descontextualização em favor de uma organização do conhecimento linear e lógica, criadas para facilitar a compreensão do conteúdo científico, a visão **acumulativa de crescimento linear** pode ser disseminada. Já o processo de despersonalização do saber sábio, ocultando a colaboração entre cientistas, pode resultar na visão **individualista e elitista** da atividade científica.

Neste ponto fica evidente que as potencialidades de se propor um debate histórico-epistemológico, através de um módulo de ensino, vão além da promoção de uma imagem mais adequada da ciência. A contraposição das visões deformadas da ciência com episódios históricos relevantes também recontextualiza e ressincretiza o saber, neste caso o conceito de simultaneidade, contribuindo para a ressignificação deste conceito no âmbito da Física.

### 3.2 A ANÁLISE DOS LIVROS DE FÍSICA BÁSICA

Os cursos de física geral universitários costumam utilizar, como bibliografia, diversas coleções, muitas das quais consagradas no ensino

universitário. Essas coleções constituem o que Kuhn (1998, p. 29) denomina de manuais científicos, responsáveis por uma grande uniformidade na formação de cientistas. Com frequência, as coleções compreendem quatro volumes, que são usualmente utilizados em quatro disciplinas em quatro semestres, consecutivamente.

Como a pretensão inicial foi aplicar o módulo de ensino aos alunos dos cursos de Licenciatura e Bacharelado em Física da UFSC, a escolha das referências a serem investigadas no presente estudo foi feita a partir dos programas das disciplinas Física Geral I-A e Física Geral IV, que compõe a grade curricular dos respectivos cursos. Essas disciplinas correspondem à formação em física geral, e possuem em seus programas os fundamentos da mecânica pré-relativística e Relatividade Restrita, respectivamente. A partir dessa lista, deu-se preferência pela escolha de coleções em que os autores abordam todo o conteúdo de interesse (Mecânica Newtoniana e Relatividade Restrita, pois se busca também analisar a evolução conceitual (se houver) dos conceitos de tempo e simultaneidade, de Newton até Einstein.

Tabela 5: Referências analisadas.

| Conteúdo                   | Referência                         | Bibliografia   |
|----------------------------|------------------------------------|--|
| Mecânica pré-relativística | (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2008a) | HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Mecânica. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. (Fundamentos da Física, v. 1)                 |
|                            | (SEARS <i>et al.</i> , 2008a)      | SEARS, F. <i>et al.</i> Física I: Mecânica. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008a.  |
|                            | (NUSSENZVEIG, 2002)                | NUSSENZVEIG, H. M. Mecânica. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1981. 519 p.  |
| Introdução à Relatividade  | (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2008b) | HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Óptica e Física Moderna. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. (Fundamentos da Física, v. 4) |
|                            | (SEARS <i>et al.</i> , 2008b)      | SEARS, F. <i>et al.</i> Física IV: Ótica e Física Moderna. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008b.                           |
|                            | (NUSSENZVEIG, 1998)                | NUSSENZVEIG, H. M. Ótica, Relatividade, Física Quântica. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998. 437 p.                        |
| Mecânica                   | (ALONSO; FINN, 1972) <sup>1</sup>  | ALONSO, M.; FINN, E. Física: um curso universitário. Addison   |

<sup>1</sup> Esta referência possui tanto o conteúdo de Cinemática e Mecânica Newtoniana quanto uma introdução à Relatividade Restrita.

|  |  |                          |
|--|--|--------------------------|
| pré- relativística<br>e Introdução à<br>Relatividade |  | Wesley, São Paulo, 1972. |
|--|--|--------------------------|

Fonte: elaborada pelo autor.



Dividiu-se a análise das obras escolhidas em dois momentos distintos: o primeiro envolveu o conceito de tempo e simultaneidade na mecânica pré-relativística, o segundo na relatividade. Privilegiaram-se os aspectos descontextualizadores e dessincretizadores, decorrentes do processo de Transposição Didática Externa, relacionados aos conceitos de tempo e simultaneidade.

### 3.2.1 TEMPO E SIMULTANEIDADE NA MECÂNICA PRÉ-RELATIVÍSTICA

Todas obras analisadas que abordam a mecânica pré-relativística **não discutem explicitamente o conceito de simultaneidade**. Mas elas utilizam, implicitamente, esse conceito em diversas situações (que serão comentadas posteriormente), junto com as discussões acerca do conceito de tempo. Por isso, optou-se por incluir o conceito de tempo na análise, visto que tempo e simultaneidade são intimamente ligados, e a partir disso analisar o conceito implícito de simultaneidade presente nas mesmas.

A falta de menção explícita à simultaneidade encontra ressonância no desenvolvimento histórico da Física, exposto no segundo capítulo desta dissertação, onde se apontou que, mesmo Barrow e Newton, não se debruçaram atentamente sobre esse conceito, e que durante o período entre Newton e Einstein, poucos **físicos** se detiveram a discutir mais profundamente o conceito de simultaneidade. As únicas exceções parecem ter sido Leibniz, que propôs uma teoria do tempo em que a noção de simultaneidade possui prioridade lógica sobre o tempo, e Poincaré, com seus ensaios sobre a convencionalidade do tempo nas teorias físicas (e sua medida).

Quando navegadores fizeram uso operacional da noção de simultaneidade em larga escala para determinar a longitude pelo método de Gemma (utilizado até o século passado), foi suficiente o emprego de relógios sincronizados. Mesmo sob a demanda de um forte desenvolvimento tecnológico, e não físico-cultural, houve muitas discussões filosóficas sobre esse assunto; como, por exemplo, fizeram Locke, Berkeley e Kant.

As obras analisadas apresentam bastante homogeneidade, todas abordando os conceitos temporais (tempo e simultaneidade) juntamente com discussões sobre grandezas físicas, medidas, unidades e espaço, nos capítulos introdutórios dos livros, como se observa no índice de duas

## referências:

1 Medição 1-1 O que É Física? 1-2 Medindo Grandezas 1-3 O Sistema Internacional de Unidades 1-4 Mudança de Unidades 1-5 Comprimento 1-6 Tempo 1-7 Massa (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2008a).

1.1 Para que serve a física? 1.2 Relações entre a física e outras Ciências 1.3 O método científico 1.4 Ordens de grandeza. Algarismos significativos 1.5 Medidas de comprimento 1.6 Sistemas de coordenadas 1.7 Medida do tempo (NUSSENZVEIG, 2002).

Nenhum dos autores dos livros analisados justifica explicitamente a opção por esta abordagem. No entanto, Alonso e Finn (1972) ressaltam que “Os físicos reconhecem a existência de quatro tipos de **grandezas fundamentais** independentes: *comprimento, massa, tempo e carga elétrica*” (ALONSO; FINN, 1972, p. 14, grifo nosso). Se o conceito de tempo é considerado fundamental, sobretudo para a mecânica pré-relativística, é coerente que sua discussão seja feita nas seções introdutórias de um livro didático.

Alonso e Finn (1972) enfatizam que “O comprimento é um conceito **intuitivo** e é uma noção que adquirimos intuitivamente: é **inútil** tentar uma definição dessa grandeza. O mesmo podemos dizer com relação ao tempo” (ALONSO; FINN, 1972, p. 14, grifo nosso). O uso do termo “intuitivo” parece sugerir que o livro adote uma concepção kantiana de tempo, citada no capítulo anterior desta dissertação, no entanto, nenhuma discussão adicional é realizada. Sobre a referida inutilidade, o desenvolvimento histórico do conceito de simultaneidade apresentado por Jammer (2006) evidencia que o emprego da noção de tempo como protagonista na cinemática (e mecânica) dependeu dos intensos debates medievais, herdados da Antiguidade grega, e que culminaram com a inversão da prioridade lógica do movimento sobre o tempo, feita por Telesio e Patrizi, e as contribuições de Gassendi, Barrow e Newton. A concepção de tempo apresentada por Alonso e Finn (1972) é claramente descontextualizada, e, como se verá logo adiante, também é contraditória. É importante ressaltar que esse livro é originalmente de 1967, portanto os autores dificilmente poderiam

incorporar contribuições de filósofos da década de 60 e 70, nos quais este trabalho se ampara.

Sobre grandezas físicas, é dito que “outra exigência importante é que as definições das quantidades físicas sejam *operacionais*, o que quer dizer que elas devem indicar, explícita ou implicitamente, como se pode medir a quantidade definida” (ALONSO; FINN, 1972, p. 14). O uso do termo “operacionais” remete a noção de definição operacional de Percy W. Bridgman, o autor desse conceito, que “entende por qualquer conceito nada mais do que um conjunto de operações; o conceito é sinônimo de um conjunto de operações correspondentes” (BRIDGMAN, 1927, p. 5, tradução nossa). Essas operações são aquelas que permitem a mensuração do conceito proposto. Assim, por exemplo, o conceito de tempo seria definido por um conjunto de operações para medi-lo; o de simultaneidade, por operações para sincronizar relógios.

Uma das motivações para Bridgman (1927) elaborar o conceito de definição operacional foi justamente a Relatividade Restrita, como fica evidente no primeiro capítulo do livro *The Logic of Modern Physics*, onde ele discute as contribuições de Einstein para sua tese filosófica sobre conceitos. As *Definições Operacionais* de Bridgman são, até certa medida, sinônimo das *Definições Coordenativas* de Reichenbach (citadas no capítulo anterior desta dissertação), ou das *Regras de Correspondência* de Carnap. Todas essas três ideias sobre conceitos foram elaboradas no mesmo período histórico, fazendo parte de um intrincado contexto do desenvolvimento filosófico da primeira metade do século XX, dominado pelas teses empiristas e positivistas, que não será abordado por fugir aos objetivos desta dissertação.

Apesar da menção explícita à noção de definição operacional, não se identificou qualquer discussão mais aprofundada sobre isso, que poderia evitar a seguinte **contradição** (evidente): se é inútil tentar uma definição do conceito de tempo, então não faz sentido afirmar que o tempo, e outras grandezas físicas, devem ser determinados operacionalmente, pois isso é trabalhar em uma definição de tempo. Alonso e Finn (1972, p. 16) também exploram a definição de segundo, apresentando a definição astronômica (aceita em 1967) e as tentativas de estabelecer um padrão usando o relógio atômico, demonstrando variados métodos de definir operacionalmente o tempo.

Desconsiderando a contradição apontada, o conceito de tempo que Alonso e Finn (1972) apresentam induz o leitor a pensar que **o tempo é aquilo que os relógios medem**. Nesse caso, dá-se primazia ao tempo físico, em contrapartida ao tempo metafísico de Newton, Barrow

ou Gassendi, por exemplo. Uma das características mais marcantes é que esse tempo depende dos processos físicos, na verdade ele é definido em termos de processos físicos (definição operacional). Assim, deixa-se (propositadamente?) aberta a possibilidade da discussão sobre a interferência das condições físicas nos processos de medição do tempo, mas que não é feita pelos autores (ainda).

O conceito de tempo físico encontra suporte filosófico no pensamento de Bridgman e Poincaré (que defendeu a convencionalidade da medida do tempo). É muito provável que boa parte do positivismo, que estava em pleno desenvolvimento no começo do século XX, e que rejeita a metafísica, também dê suporte filosófico para essa concepção de tempo.

Não se pode afirmar que, apesar da contradição mostrada anteriormente, o conceito de tempo apresentado seja equivocado ou ingênuo. Infelizmente, a raiz histórico-filosófica deste conceito é omitida pelos autores, impedindo discussões mais profundas. Mas ele é suficiente para dar sentido às equações espaço-temporais da mecânica pré-relativística. Além disso, a mecânica pré-relativística aborda tanto a cinemática quanto a Mecânica Newtoniana, que historicamente não foram formuladas com essa noção de tempo físico, que só apareceu no início do século XX. Assim sendo, **um conceito moderno de tempo (e sua sustentação filosófica) está sendo utilizado de forma anacrônica, ou seja, apresenta-se de maneira dessincretizada.**

A noção de simultaneidade que se pode derivar dessa concepção de tempo, e que está implícita ao leitor, é: **eventos simultâneos são aqueles que ocorrem no mesmo instante  $t$  de um relógio.** O conceito de tempo apresentado possui prioridade lógica sobre a simultaneidade, pois a simultaneidade é definida em função do conceito de tempo.

O uso implícito do conceito de simultaneidade esconde ainda mais os processos de descontextualização e dessincretização, torna-os invisíveis, mas não menos presentes. Pelo contrário, isso aumenta os efeitos nocivos destes processos, pois o leitor sequer tem consciência clara que os autores estão fazendo uso do conceito, logo dificilmente vão se questionar sobre o seu desenvolvimento histórico. Isso amplifica os malefícios inerentes da transposição didática à formação de uma imagem mais fidedigna do empreendimento científico.

O estudo histórico apresentado no capítulo anterior dessa dissertação evidencia que o conceito de simultaneidade foi bastante discutido por físicos, filósofos e matemáticos, como Leibniz, Locke, Berkeley, Kant, Poincaré e, principalmente, Einstein, apresentando

concepções muito variadas entre os séculos XVI e XX. A noção de que eventos simultâneos são aqueles que ocorrem no mesmo instante  $t$  de dois relógios sincronizados não é moderna. Na verdade, ela remonta pelo menos ao método de Gemma, utilizado para medir longitudes na navegação. Mas nenhuma discussão contextualizada é apresentada.

A exposição mais curta sobre o conceito de tempo é feita no livro de Sears *et al.* (2008a, p. 4), no tópico *1.3 Padrões e Unidades*. Na discussão geral sobre grandezas, é dito que

Algumas grandezas físicas são tão fundamentais que podemos defini-las somente descrevendo como elas são medidas. Tal definição chama-se definição operacional. Alguns exemplos: medir uma distância usando uma régua e medir o intervalo de tempo usando um cronômetro. Em outros casos, definimos uma grandeza física descrevendo como calculá-la a partir de outras grandezas que podemos medir (SEARS *et al.*, 2008a, p. 4, grifo nosso).

No que se refere às grandezas físicas, tal afirmação demonstra entendimento semelhante ao de Alonso e Finn (1972), portanto não há nada a acrescentar nesse aspecto. Com relação à unidade de tempo, devido à brevidade com que o assunto é tratado, cita-se *in extenso*:

De 1889 até 1967, a unidade de tempo era definida como uma certa fração do dia solar médio, a média de intervalos de tempo entre sucessivas observações do Sol em seu ponto mais elevado do céu. O padrão atual, adotado em 1967, é muito mais preciso. Fundamentado em um relógio atômico, usa a diferença de energia entre os dois menores estados de energia do átomo de césio. Quando bombardeado com microondas de uma dada frequência, os átomos de césio sofrem transições de um estado para outro. Um segundo (abreviado com s) é definido como o tempo necessário para a ocorrência de 9.192.631.770 ciclos desta radiação (SEARS *et al.*, 2008a, p. 4).

De forma coerente, Sears *et al.* (2008a) definem o tempo em

termos de processos físicos utilizados para medi-lo. É o mesmo conceito de tempo e de simultaneidade presentes em Alonso e Finn (1972), acompanhado igualmente da característica descontextualizada e dessincronizada. A diferença é que, sendo uma bibliografia mais atual que Alonso e Finn (1972), já utiliza uma definição de tempo também mais atual (atômica).

O livro de Halliday, Resnick e Walker (2008a, p. 2) também sugere que o tempo seja uma grandeza fundamental, mas não apresenta uma discussão sobre o conceito de tempo. Em vez disso, o livro discute diretamente a medição do tempo:

Qualquer fenômeno repetitivo pode ser usado como padrão de tempo. A rotação da Terra, que determina a duração do dia, foi usada para esse fim durante séculos [...] Um relógio de quartzo, no qual um anel de quartzo é posto em vibração contínua, pode ser sincronizado com a rotação da terra por meio de observações astronômicas e usado para medir intervalos de tempo no laboratório [...] Para atender à necessidade de um melhor padrão foram desenvolvidos relógios atômicos. Um relógio atômico do National Institute of Standards and Technology (NIST) em Boulder, Colorado, EUA, é o padrão da Hora Coordenada Universal (UTC) nos Estados Unidos [...] Para acertar um relógio de forma extremamente precisa no local onde você se encontra seria necessário levar em conta o tempo necessário para que esses sinais cheguem até você (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2008a, p. 6-7).

Essa discussão sobre a medida do tempo pode sugerir a um leitor mais atento ao menos dois questionamentos. O primeiro é como garantir que a rotação da Terra seja periódica? É periódica por *definição*. No prosseguimento da discussão, os autores apresentam um gráfico que mostra as variações sazonais do dia terrestre em comparação com um relógio atômico, e esclarecem que “desconfiamos da Terra quando existe uma diferença entre a Terra e um átomo como padrões de tempo. A variação se deve a efeitos de maré causados pela Lua e pela circulação atmosférica” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2008a, p. 7). Os

autores tratam a definição de tempo como uma questão de escolha mais adequada entre fenômenos periódicos para realizar sua medida, mas não entram em uma discussão mais aprofundada sobre essa questão. O segundo questionamento é como se sincroniza relógios com fenômenos astronômicos (ou entre relógios)? É uma referência explícita à noção de simultaneidade, mencionando a preocupação com o tempo de propagação do sinal de sincronização. Infelizmente, nenhuma discussão adicional é feita sobre essa questão.

A abordagem mais completa sobre o conceito de tempo é feita por Nussenzweig (2002). Segundo este autor, “Qualquer fenômeno periódico, ou seja, que se repete sem alteração cada vez que transcorre um intervalo de tempo determinado (período) pode em princípio ser associado com um relógio” (NUSENZVEIG, 2002, p. 13). Em seguida, o autor questiona: como ter certeza que os intervalos de tempo marcados por um relógio são iguais?

A resposta é que não sabemos. Não adianta invocarmos a sensação subjetiva da passagem do tempo (tempo psicológico), que está associado a um “relógio biológico”, definido pelo ritmo de nosso metabolismo. [...] Tudo o que podemos fazer é comparar relógios diferentes e decidir através de tais comparações e de argumentos teórico sobre as leis que governam o fenômeno periódico qual relógio merece maior grau de confiança (NUSENZVEIG, 2002, p. 13-14).

A discussão prossegue com o autor apresentando sucintamente o desenvolvimento tecnológico dos relógios, abordando a clepsidra, ampulheta, relógio de pêndulo, **o cronômetro marítimo de John Harrison**, relógio de quartzo e o relógio atômico. Nesta discussão, dá-se ênfase à precisão, cada vez maior dos instrumentos, de acordo com o fenômeno físico periódico que é utilizado. Também realiza-se uma exposição, bastante detalhada, sobre métodos de medição de tempos muito pequenos, da ordem de  $10^{-9}$  segundos (osciloscópio) e muito longos, da ordem de  $10^{12}$  segundos (milhares de anos), como a datação radioativa através de isótopos de potássio ou carbono ( $K^{40}$  e  $C^{14}$ ).

Moysés Nussenzveig encerra a discussão sobre tempo abordando o conceito newtoniano. Após citar a definição newtoniana, o autor diz que o objetivo da longa discussão anterior sobre relógios

Foi tornar patente o fato de que o tempo físico é definido em termos de relógios, que são objetos concretos sujeitos às leis físicas. A atitude expressa por Newton ignorando este fato foi em parte responsável, dada a autoridade de que se revestia, pelo preconceito de que o tempo não poderia ser afetado por qualquer condição física” (NUSENZVEIG, 2002, p. 21).

É notável, se comparada às outras obras aqui analisadas, a tentativa de Nussenzveig (2002) em incorporar discussões históricas e filosóficas em seu livro. Entretanto, segundo Jammer (2006, p. 69), a concepção newtoniana foi influenciada principalmente pela leitura da obra *Lectioes Geometricae* (1669), de Issac Barrow, que “disjuntou o tempo de sua conjugação aristotélica com o movimento” (JAMMER, 2006, p. 69, tradução nossa). A concepção metafísica de tempo surge como uma tentativa de desvincular o tempo do movimento, tendo sido motivo de intensos debates durante todo o período medieval. Não foi por mero preconceito que Newton “ignorou” que o tempo pudesse ser afetado por condições físicas, mas porque foi herdeiro do debate filosófico da época, tal qual é descrito mais detalhadamente no capítulo anterior desta dissertação.

Mesmo Barrow, que defendia a existência do tempo independente de processos físicos, admite que o movimento deve ser usado para medir o tempo. Barrow se perguntou, assim como Nussenzveig, sobre como garantir que movimentos que se repetem (como o dos astros) sejam periódicos, e respondeu que é possível verificar isso comparando diferentes maneiras de medir o tempo. A resposta de Nussenzveig à mesma questão, citada anteriormente, é semelhante à de Barrow. Já Newton **deixou essa questão em aberto**, portanto, tem-se aqui mais um argumento de que não foi por mero descuido (preconceito) Newton ter “ignorado” as condições físicas que podem afetar relógios. Portanto, a tentativa de contextualização história de Nussenzveig (2002) mostra-se equivocada e ingênua.

Apesar da apresentação mais cuidadosa (do conceito de tempo) no livro de Nussenzveig (2002), o conceito de *tempo físico* induzido ao



leitor é: **tempo é aquilo que os relógios medem**. Também é apresentado de maneira historicamente descontextualizada (apesar da notável tentativa de contextualizá-lo) e padece do mesmo processo de dessincretização.

O conceito de simultaneidade implícito que se pode derivar dessa discussão em Nussenzweig (2002) é que, **eventos simultâneos ocorrem no mesmo instante  $t$  de um relógio**, e apresenta-se descontextualizado e dessincretizado, como nas referências anteriormente analisadas. No entanto, Nussenzweig (2002) abordou a evolução dos relógios, inclusive do cronômetro de Harrison, que foi desenvolvido para uso no método de Gemma de determinação da longitude. Nesse ponto Nussenzweig (2002) poderia ter discutido a noção de simultaneidade implícita no método de Gemma, que é: **dois eventos são simultâneos quando ocorrem no mesmo instante  $t$  de dois relógios sincronizados**. Infelizmente isso não ocorreu, deixando-se de realizar uma contextualização histórica do conceito de simultaneidade que está implícito no próprio livro. Outra oportunidade ocorreu na discussão que Nussenzweig (2002, p. 9-10) realizou sobre medidas de comprimento, onde ele apresentou o método de Eratóstenes. Esse método já foi discutido no capítulo anterior desta dissertação, e envolve a noção de simultaneidade não local entre dois pontos na superfície terrestre.

É importante situar as afirmações histórico-filosóficas de Nussenzweig em seu devido contexto: o primeiro volume de sua coleção de física básica é de 1981, antes da reaproximação da HFC com o EC, que ocorreu na segunda metade dos anos oitenta, conforme foi discutido no primeiro capítulo dessa dissertação.

Outro ponto é que uma coleção de física básica não visa aprofundar questões histórico-filosóficas, e eventualmente pode conter alguma deformação desta natureza, tal qual foi exemplificado na questão do tempo newtoniano. Entretanto, essa dissertação de mestrado tem por objetivo esclarecer alguns aspectos histórico-filosóficos relacionados ao conceito de simultaneidade, portanto, aponta e discute deformações históricas e conceituais que eventualmente existam.

De maneira geral, os autores dos livros analisados evadem-se de uma discussão mais profunda do conceito de tempo, mesmo admitindo que este seja um conceito fundamental na física. Não levam em consideração o desenvolvimento histórico do mesmo, privilegiando apenas discussões sobre a medida do tempo e suas unidades. Nem mesmo o conceito newtoniano é adequadamente apresentado, mesmo considerando que a mecânica pré-relativística tem como base a

### Mecânica Newtoniana.

As discussões são bastante homogêneas, e reconhecem apenas o *tempo físico* medido pelos relógios. Portanto, pode-se afirmar que todos os autores induzem o leitor a noção de que **o tempo é aquilo que os relógios medem**. Tal entendimento parece ser suficiente para dar significado ao tempo  $t$  que aparece nas equações espaço-temporais da mecânica pré-relativística, mas poderia haver um embasamento físico e filosófico (que existe) mais completo. Mesmo considerando apenas o tempo a partir de Newton, os livros apresentam esse conceito completamente à margem de seu desenvolvimento histórico (descontextualizado), sem mencionar cientistas importantes, como Leibniz, Mach e Poincaré, ou grandes filósofos, como Locke, Berkeley e Kant. Por fim, Nussenzweig chama a atenção para o fato de que

Não podemos saber, a priori, como o andamento de um relógio é afetado por condições físicas extremas, muito remotas de nossa experiência cotidiana, por exemplo, pelo transporte do relógio a velocidades extremamente elevadas (comparáveis à velocidade da luz), ou pela presença de campos gravitacionais extremamente intensos. A experiência mostra de que tais condições de fato afetam a marcha do relógio (NUSSENZVEIG, 2002, p. 21).

Essas condições só serão conhecidas com o advento da Relatividade Restrita, em 1905. Os métodos de datação radioativa, relógios de quartzo e atômicos, que também são abordados por todos os livros aqui analisados, só serão inventados muito depois da formulação da mecânica pré-relativística. Dessa forma, **não só o conceito de tempo, mas também a sua medida, são discutidos de maneira claramente dessincretizada**.

No conjunto geral, a noção de simultaneidade implícita que pode ser deduzida das obras analisadas é de que **eventos são simultâneos quando ocorrem no mesmo tempo  $t$  de dois relógios quaisquer**. Ela supõe que o tempo, e simultaneidade, dependem de processos físicos, mas é absoluta porque condições físicas extremas não são (ainda) consideradas pelos autores na exposição da mecânica pré-relativística. Os conceitos de tempo, e simultaneidade, são absolutos *por acidente*.

Essa noção tem um apelo intuitivo também, pois no mundo

moderno, em que relógios precisos são abundantes, faz-se uso da sincronização de eventos cotidianamente, tanto localmente quanto não-localmente, toda vez que “temos hora marcada” para algo. Por exemplo: uma consulta médica, um encontro de negócios, um horário de aula, uma videoconferência ou um cinema com os amigos. A intuição também supõe um caráter absoluto, pois ninguém parece se questionar se os relógios andam de modo intrinsecamente diferente para cada um. Socialmente, discrepâncias de sincronização são atribuídas a um relógio danificado ou mal acertado com o horário civil estabelecido.

Mas esse não é o mesmo sentido de tempo e simultaneidade absoluta de Newton, Barrow ou Gassendi, que derivam de um conceito metafísico de tempo, que é **independente de processos físicos**. Inclusive, Newton deixa em aberto que pode haver discrepâncias entre relógios que usam diferentes fenômenos físicos periódicos, mas que ainda assim o tempo tem caráter absoluto. Portanto, não é o funcionamento dos relógios que determina a marcha do tempo. Essa diferença entre as noções de absoluto pode ser motivo de confusão quando se pretende apresentar a Relatividade Restrita, e será retomada mais adiante.

Resumidamente, esta análise do período da mecânica pré-relativística aponta que, em geral, os autores analisados:

- Suprimem, no processo de transposição didática externa, a noção de tempo e simultaneidade metafísica de Newton e Barrow, e as posteriores contribuições, até Einstein.<sup>2</sup>
- Apresentam um conceito de tempo e simultaneidade moderno, com raízes epistemológicas no início do século XX, e muito mais próximo da relatividade do que do seu referente newtoniano.

Todas as referências analisadas apresentaram o uso implícito do conceito de simultaneidade. Como já comentado, isso torna os efeitos dos processos de descontextualização e dessincretização muito mais significativos.

---

2 Com exceção parcial de Nussenzveig (2002), que faz breve exposição do conceito newtoniano.

### 3.2.2 TEMPO E SIMULTANEIDADE NA INTRODUÇÃO À RELATIVIDADE RESTRITA

A primeira observação interessante é que todos os livros analisados fazem referências históricas relativas à gênese da relatividade, induzindo o leitor a pensar que pretendem realizar uma abordagem historicamente contextualizada. Essas referências incluem os postulados de Einstein, sendo a relatividade introduzida a partir deles, semelhante à formulação original de 1905.

O conceito de simultaneidade é extremamente importante na formulação da relatividade baseada nos postulados, e considerando a falta de discussão desse conceito quando os autores abordaram a mecânica pré-relativística, espera-se que os mesmos apresentem, então, uma discussão conceitual mais profunda.

É importante ressaltar que os autores introduzem a relatividade a partir dos postulados, mas existem outras formulações que não recorrem à eles, como, por exemplo, fazem Mermin (1984), Kauffman (1985), Field (2001) e Friedman e Gofman (2002). Não é objetivo desta dissertação uma análise da adequação geral das propostas didáticas dos livros, em termos conceituais ou histórico-filosóficos<sup>3</sup>. No entanto, considera-se necessário apresentar descritivamente o contexto no qual os autores analisados realizam as discussões sobre a simultaneidade,

No livro de Alonso e Finn (1972), a introdução à Relatividade Restrita não é feita em um tópico específico, mas ao longo do livro. O primeiro momento em que a relatividade aparece explicitamente é quando os autores discutem, no capítulo 6, intitulado *Movimento Relativo*, a Transformação de Lorentz. A discussão inicia-se com uma referência histórica ao éter luminoso e as tentativas experimentais de Michelson e Morley para encontrar diferenças entre a velocidade da luz em diferentes direções relativas à Terra. Após os resultados negativos dos experimentos, os autores dizem que

O enigma de Michelson e Morley foi resolvido em 1905, quando Einstein enunciou o seu princípio da relatividade, o qual será discutido mais detalhadamente na Sec. 11.3. Esse princípio

---

3 Discussões dessa natureza podem ser encontradas em Arriasecq e Greca (2002, 2003, 2007, 2010).

afirma que todas as leis da natureza devem ser as mesmas (i.e., devem permanecer invariantes) para todos os observadores em movimento relativo de translação uniforme. Einstein admitiu a velocidade da luz como um invariante físico, tendo o mesmo valor para todos os observadores. Como veremos mais tarde, essa exigência decorre da aplicação do princípio da relatividade ao eletromagnetismo (ALONSO; FINN, 1972, p. 129).

De forma explícita, os dois postulados de Einstein são enunciados, sem identificá-los como tal, ou realizar-se discussões mais aprofundadas sobre o seu significado. Com relação ao postulado da constância da velocidade da luz

Como a velocidade é a distância dividida pelo tempo, pode ser que tenhamos de ajustar o tempo bem como a distância para que o quociente dos dois permaneça com o mesmo valor para observadores em movimento relativo, como acontece no caso da velocidade da luz. Em outras palavras, o intervalo de tempo entre dois acontecimentos não é o mesmo para dois observadores em movimento relativo. Assim, devemos substituir a transformação de Galileu por outra, de modo que a velocidade da luz seja invariante (ALONSO; FINN, 1972, p. 129, grifo nosso).

Mesmo que não esteja explícito, esse trecho é equivalente a dizer que a simultaneidade torna-se relativa, de tal forma que mantenha a velocidade da luz invariante. Alonso e Finn (1972) deduzem a Transformação de Lorentz e concluem dizendo que

Embora os resultados numéricos da transformação de Lorentz, na maioria dos casos, não difiram muito dos resultados da transformação de Galileu, sob o ponto de vista teórico, a transformação de Lorentz representa uma mudança conceitual muito profunda,

especialmente em relação ao espaço e ao tempo (ALONSO; FINN, 1972, p. 131).

Espera-se que os autores discutam essa mudança conceitual, mas isso não ocorre, limitando-se a dedução da *contração do comprimento* e a *dilatação do tempo*, como se uma demonstração matemática implicasse necessariamente em um novo quadro conceitual. O uso da Transformação de Lorentz **por si só não representa mudança profunda alguma**, pois Lorentz e Poincaré interpretaram a diferença de intervalos de tempo em termos de um *tempo absoluto* e um *tempo local*. Foi Einstein quem propôs uma revisão no conceito de tempo e simultaneidade, realizando uma mudança profunda no quadro conceitual da mecânica. Conforme a pesquisa histórica apresentada no capítulo anterior, sua contribuição nesse aspecto foi original e inestimável.

Na dedução da *contração do comprimento* os autores comentam sobre o papel da simultaneidade em medições de comprimento:

O comprimento de um objeto pode ser definido como a distância entre seus pontos extremos. Entretanto, para o observador medir o comprimento de um objeto movendo-se relativamente a ele, as posições dos dois pontos extremos devem ser registradas simultaneamente (ALONSO; FINN, 1972, p. 135).

Justamente porque a simultaneidade é relativa que a medida do comprimento varia para diferentes observadores em movimento uniforme relativo. Essa argumentação não é explorada em profundidade, mas é utilizada na dedução matemática feita pelos autores.

O segundo momento em que Alonso e Finn (1972) discutem a relatividade é no capítulo 11, intitulado *Dinâmica de Alta Energia*. Vários conceitos são rediscutidos, como energia cinética, força, colisões em altas energias... **No entanto, o conceito de simultaneidade, ainda que importante e útil, não é mencionado**. Os autores ressaltam que a motivação deste capítulo é o fato de que

encontramos discrepâncias quando estudamos o movimento de partículas com energias muito altas, tais como elétrons interiores dos átomos ou as partículas que se encontram nos raios cósmicos

ou são produzidos em aceleradores de alta energia. O objetivo deste capítulo é desenvolver uma teoria geral de movimento que seja válida tanto para partículas com energias baixas como para as de altas energias (ALONSO; FINN, 1972, p. 312).

Apesar de não ser o objetivo desta dissertação fazer uma análise geral da proposta de ensino de relatividade, como já foi ressaltado, não é possível deixar de observar que a pretensa motivação exposta acima pelos autores é claramente dessincritizada, visto que a gênese da relatividade não está relacionada com o estudo de partículas de altas energias. Sequer existiam aceleradores de alta energia na virada do século XX.

Na sequência deste capítulo, Alonso e Finn (1972) desenvolvem a dinâmica relativística a partir dos dois postulados de Einstein e de uma nova definição de *momento*. Vários conceitos são rediscutidos, como energia cinética, força, colisões em altas energias... **O conceito de simultaneidade não é mencionado.**

Como se pode notar, os autores não parecem distinguir claramente a diferença do quadro conceitual da mecânica pré-relativística e da Relatividade Restrita. Com isso, corre-se o risco de induzir ao leitor menos atento a acreditar que a Mecânica Newtoniana é um caso especial da relatividade para baixas velocidades e energias (ou, alternativamente, que a relatividade é uma extensão da Mecânica Newtoniana para altas velocidades e energias). Entretanto, supõe-se que as discussões conceituais, históricas e filosóficas apresentadas no capítulo dois desta dissertação deixam claro que se tratam de **corpos teóricos distintos**.

De modo algum se cogita que os referidos autores não compreendam a diferença conceitual entre a mecânica pré-relativística e a Relatividade Restrita, mas que a falta de distinção clara entre os respectivos quadros conceituais seja uma opção didática dos autores para um curso introdutório do tema. Se tal estratégia é ou não adequada para o ensino de relatividade, não é objeto de discussão dessa dissertação de mestrado.

Também se deve evitar o anacronismo na análise, pois o livro é oriundo da década de 70, antes da influência das epistemologias pós modernas na reaproximação da HFC com EC, ocorrida nos anos 80. Não se deve esperar que discussões histórico-filosóficas, sob uma

perspectiva epistemológica contemporânea, como a utilizada neste trabalho de mestrado, fossem realizadas.

Duas abordagens muito semelhantes são realizadas por Halliday, Resnick e Walker (2008b) e Sears *et al.* (2008b), nas quais, diferentemente de Alonso e Finn (1972), apresentam a Relatividade Restrita em um tópico específico e discutem explicitamente o conceito de simultaneidade. Ambas iniciam com pequenos textos introdutórios de caráter histórico, mas sem a pretensão de ser uma contextualização histórico-filosófica. Os dois postulados da Relatividade Restrita são enunciados, e identificados como tal.

Em relação ao postulado da invariância da velocidade da luz (segundo postulado), Halliday, Resnick e Walker (2008b) afirmam que

Outra forma de enunciar esse postulado é dizer que existe na natureza uma velocidade-limite  $c$ , que é a mesma em todas as direções e em todos os referenciais inerciais. A luz se propaga com essa velocidade-limite [...] A existência de um limite para a velocidade dos elétrons foi demonstrada em 1964 em um experimento de W. Bertozzi [...] O experimento mostrou que quando uma força é aplicada a um elétron que está se movendo em alta velocidade a energia cinética aumenta, mas a velocidade praticamente não varia (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2008b, p. 148).

Sears *et al.* (2008b, p. 143) também afirmam que o segundo postulado de Einstein implica na conclusão de que um observador inercial não pode se deslocar com velocidade superior à luz no vácuo.

Na formulação original de 1905, Einstein não discute a existência de uma velocidade limite para as interações da natureza. Como foi abordado no segundo capítulo desta dissertação, o entendimento de que a velocidade da luz no vácuo é a velocidade limite das interações da natureza só ocorreu mais tarde, em 1907, quando se incluiu o princípio da antecedência das causas junto à Relatividade Restrita. Os postulados da Relatividade Restrita não proibem diretamente velocidades supraluminais, nem existiam aceleradores de elétrons de altas energias. O exemplo do movimento do elétron, apresentado acima por Halliday, Resnick e Walker (2008b), é dessincretizado e até conceitualmente equivocado.



A confusão é recorrente em muitas referências sobre a Relatividade Restrita, tanto que

a proibição de cadeias causais propagando-se com uma velocidade superior à da luz [no vácuo] tornou-se um artigo de fé na teoria da relatividade especial. Tornou-se, pois, tão difícil separar a teoria do princípio da antecedência das causas, que muitos físicos e mesmo filósofos da Ciência - como Mario Bunge - passaram a afirmar que a teoria da relatividade em si mesma proíbe a existência de propagação de influências com velocidade superior à luz no vácuo (MARTINS, 1986).

Esse ponto é importante, pois a relatividade da simultaneidade deriva da invariância da luz, como demonstrou Einstein em 1905. **Mas a relatividade da simultaneidade, estendida para todas as interações da natureza, como por exemplo a gravitação, só ocorre com a inclusão do princípio da antecedência da causa.** Aponta-se, portanto, a necessidade de se incluir esse princípio no ensino introdutório da Relatividade Restrita, quando este é feito através dos postulados. Caso contrário, corre-se o risco de uma compreensão incompleta dos fundamentos da Relatividade Restrita, principalmente da relatividade da simultaneidade.

É importante lembrar que a relatividade da simultaneidade foi um dos pontos de maior discórdia entre os defensores e opositores da relatividade, no início do século XX. Ela também altera radicalmente a imagem física da realidade, tal como ocorreu quando Roemer e Bradley puseram fim à tese da simultaneidade visual aristotélica.

O procedimento de sincronização de relógios é apresentado tanto por Halliday, Resnick e Walker (2008b) quanto por Sears *et al.* (2008b), à margem de qualquer discussão explícita sobre simultaneidade. Entretanto, como o conceito de simultaneidade implícito nessas obras é o de que eventos simultâneos são aqueles que ocorrem no mesmo instante  $t$  de dois relógios sincronizados, infere-se que os autores estejam definindo **indiretamente** o conceito de simultaneidade no âmbito da relatividade. Segundo Halliday, Resnick e Walker (2008b)

Se dispuséssemos de um método para transmitir

sinais com velocidade infinita, sincronizar os relógios seria uma tarefa trivial. Entretanto, nenhum sinal conhecido possui essa propriedade. Assim que escolhemos a luz (interpretada no sentido amplo como representando qualquer onda eletromagnética) para transmitir os sinais de sincronismo, já que, no vácuo, a luz viaja com a maior velocidade possível, a velocidade-limite  $C$ . Aqui está uma das muitas formas pelas quais um observador pode sincronizar uma rede de relógios usando sinais luminosos: o observador convoca um grande grupo de auxiliares temporários, um para cada relógio. Depois de se colocar em um ponto escolhido para ser a origem o observador produz um pulso luminoso no momento em que seu relógio indica  $t=0$ . Quando o pulso luminoso chega ao local onde se encontra um dos auxiliares, esse auxiliar ajuda o relógio desse local para indicar  $t = r/c$ , onde  $r$  é a distância entre o auxiliar e a origem (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2008b, p. 149).

Já Sears *et al.* (2008b) utiliza a definição do ponto médio de Einstein (1917), quando diz que

Podemos sincronizar esses relógios sem dificuldades, desde que estejam em repouso no mesmo sistema de referência. Por exemplo, a partir de um ponto equidistante entre os dois relógios, poderíamos enviar um pulso de luz simultaneamente para os dois relógios. Quando os pulsos atingirem os relógios, os observadores ajustarão a hora para um valor predeterminado (SEARS *et al.*, 2008b, p. 148).

Esses procedimentos de sincronização, por considerarem (erroneamente) de antemão o sinal luminoso como sendo a velocidade limite das interações da natureza, não encorajam uma discussão sobre o caráter de convencionalidade (definição) desses procedimentos, e do conceito de simultaneidade, tal como ocorreu historicamente. As próprias referências Alonso e Finn (1972) e Sears *et al.* (2008b), por terem citado explicitamente a noção de definição operacional para o

conceito de tempo na mecânica pré-relativística, poderiam ter discutido essa questão na relatividade também.

O debate acerca dessa convencionalidade é um dos pontos mais importantes apresentados na obra de Jammer (2006), e mereceu especial atenção na gênese da Relatividade Restrita, com contribuições filosóficas e físicas importantes de Poincaré, Einstein e Reichenbach. Um dos pontos principais dessa discussão é que o procedimento de Einstein não é o único possível para determinar a simultaneidade, tal como ele mesmo reconheceu.

Ambas as referências, Halliday, Resnick e Walker (2008b) e Sears *et al.* (2008b), deduzem a relatividade da simultaneidade apresentando um experimento mental idêntico ao utilizado por Einstein (1917), denominado de experimento trem-estação, que foi comentado no capítulo anterior dessa dissertação.

Tanto o procedimento de sincronização de relógios quanto o conceito de simultaneidade, são apresentados de maneira bastante dessincretizada e descontextualizada historicamente. Esse fato limita as possíveis discussões sobre as mudanças no quadro conceitual entre a mecânica pré-relativística e a Relatividade Restrita.

A última referência analisada é Nussenzveig (1998), que foi deixada por último por possuir uma abordagem mais completa. O autor também realiza a discussão da relatividade em um tópico específico, iniciando com uma problematização, **não histórica**, recordando de alguns fatos já discutidos em outros volumes de sua coleção de física básica, que são: (1) a constância da velocidade da luz no vácuo, obtida das equações de Maxwell; (2) o princípio da relatividade de Galileu, a Transformação de Galileu e a regra de transformação de velocidades; (3) a invariância das leis da Mecânica Newtoniana sob a Transformação de Galileu.

Em seguida, o autor demonstra que a regra de transformação de velocidades de Galileu (2) é incompatível com a constância da velocidade da luz no vácuo (1), portanto não seria possível aplicar o princípio da relatividade à Mecânica Newtoniana e à eletrodinâmica simultaneamente. Esse é justamente o problema fundamental que levou Einstein a formular a Relatividade Restrita.

Uma maneira alternativa de entender o problema é dizer que a Mecânica Newtoniana é invariante sob a Transformação de Galileu, enquanto a eletrodinâmica é invariante sob a Transformação de Lorentz. Entretanto, para que duas teorias sejam coerentes entre si, o princípio da relatividade tem que ser aplicado somente com um grupo de

transformação. Como se tem dois grupos de transformação distintos, não é possível aplicar o princípio da relatividade simultaneamente às duas teorias. Portanto,

Teria de ser válida, portanto, uma das seguintes opções:

(i) A mecânica newtoniana e as equações de Maxwell são válidas, mas o princípio da relatividade não se aplica a todas as leis físicas: existe um referencial absoluto (o éter), onde a velocidade da luz é  $c$  em todas as direções, e deve ser possível, por meio de experiências eletromagnéticas, detectar [sic] um movimento retilíneo e uniforme em relação ao referencial absoluto do éter.

(ii) O princípio da relatividade aplica-se a todas as leis físicas e a mecânica newtoniana é correta. Nesse caso, as equações de Maxwell teriam de ser modificadas, e deveria ser possível observar desvios das leis da eletrodinâmica clássica.

(iii) O princípio da relatividade aplica-se a todas as leis físicas, e as equações de Maxwell são corretas. Nesse caso, a mecânica newtoniana e a transformação de Galileu não podem ser corretas: deve ser possível observar desvios das leis da mecânica newtoniana. A única opção compatível com os fatos experimentais, conforme vamos ver, é a (iii) (NUSSENZVEIG, 1998, p. 177).

Nussenzveig (1998) cumpre a promessa e apresenta três fatos experimentais: (1) os experimentos feitos por Michelson (1881), Michelson e Morley (1887), e a conclusão negativa dos mesmos; (2) o experimento de Georg Joos, em 1930, que replicou o experimento de Michelson e Morley de maneira mais precisa, mas que também obteve resultado negativo; (3) a teoria da emissão da luz de Ritz, de 1908, onde ele diz que a velocidade da luz deve ser interpretada em relação à fonte emissora, mas que fora descartada por experimentos feitos pela Organização Europeia para Pesquisa Nuclear (CERN), em 1964.

A apresentação de tais experimentos visa persuadir o leitor a aceitar a opção (iii), e abandonar a Transformação de Galileu e a Mecânica Newtoniana, como fez Einstein. Dos experimentos citados por Nussenzveig (1998), apenas os de Michelson e Morley estavam disponíveis à época para a consideração de Einstein (existiam outros, mas não foram citados). O autor, no intuito de justificar com mais força a opção de Einstein ao leitor, recorreu a fatos experimentais que não pertencem ao contexto da formulação da teoria (1905), tornando o recurso um exemplo de contextualização equivocada (anacronismo) e dessincretização, e possivelmente fomentando visões deformadas da ciência.

Entende-se, neste trabalho de mestrado, que o desenvolvimento filosófico e físico, desde Newton até Einstein, em especial a rica trama conceitual antes de 1905, poderia ser utilizado para justificar a opção de Einstein. Não se sugere que fatos experimentais posteriores tenham menos importância, mas sim que não exista confusão entre o contexto da descoberta e o contexto da justificação, no EC, para não serem propagadas visões deformadas da ciência.

Após essa problematização, Nussenzveig (1998, p. 182) enuncia os dois postulados da Relatividade Restrita, citando *in extenso* um trecho da introdução do artigo de 1905, de Einstein, em que os postulados são apresentados. Em seguida, aborda o conceito de simultaneidade, o ponto principal da presente análise.

Para investigar o conceito de simultaneidade, diferentemente do que fazem os outros autores, Nussenzveig (1998, p. 183) sugere a análise de uma frente de onda, oriunda de uma única fonte luminosa puntiforme, mas observada em dois referenciais inerciais distintos (ou seja, duas frentes de ondas). E conclui que, considerando os dois postulados da relatividade, as esferas formadas pelas duas frentes de onda teriam dois centros distintos. Como é possível uma mesma esfera com dois centros distintos? A contradição desaparece quando se considera que não se trata da mesma esfera, mas de duas esferas diferentes. Isso ocorreria porque aquilo que é simultâneo em um referencial (a esfera formada por uma frente de onda) não é simultâneo em outro referencial. Portanto, não se trata de uma mesma esfera com dois centros diferentes, mas de esferas diferentes! E conclui que

**Einstein percebeu que** a validade dos Princípios A e B [postulados da relatividade] exigia que fosse aprofundada a análise do conceito de

simultaneidade de eventos em pontos distantes, quando analisada em referenciais diferentes. Como ele observa no seu trabalho de 1905 (NUSSENZVEIG, 1998, p. 183, grifo nosso).

Segundo Jammer (2006, p. 107), a percepção desse fato não se originou nesse exemplo das esferas, mas do que ocorreu em uma conversa entre Einstein e seu colega Besso, cinco semanas antes da conclusão do artigo de 1905. Possivelmente, muitas situações físicas devem ter sido discutidas entre Einstein e Besso, mas não há registro conhecido do conteúdo exato dessa conversa. Provavelmente, o exemplo das esferas foi formulado pelo próprio Nussenzveig, ou então retirado de alguma bibliografia utilizada como referência.

A intenção deliberada do autor, de misturar a fatos históricos (as várias citações do artigo de 1905 de Einstein, por exemplo) com a exposição da teoria (relatividade), mesmo que tenha boa intenção didática, pode confundir o leitor desavisado, e levá-lo a crer que o exemplo das esferas fez parte do intrincado contexto de construção da Relatividade Restrita. Nesse caso, ocorre uma dessincretização do saber *por acidente*. Ela decorre mais pela omissão e descuido do autor do que por suas intenções didáticas deliberadas.

Após isso, Nussenzveig (1998) se detém a discutir a noção de simultaneidade local, citando *in extenso* um trecho do artigo de 1905 em que Einstein discute essa questão. Ao final, Nussenzveig (1998) se pergunta: “mas como podemos saber que dois eventos que ocorrem em *lugares diferentes*, tais como dois pontos P1 e P2, são simultâneos?” (NUSSENZVEIG, 1998, p. 183).

A resposta dada é que dois eventos são simultâneos quando dois relógios, um em P1 e outro em P2, marcam o mesmo tempo  $t$ , desde que estejam **sincronizados**. Esse entendimento de simultaneidade já estava implícito na exposição da mecânica pré-relativística. Então, Nussenzveig (1998) apresenta dois métodos de sincronização. O primeiro método recorre a uma definição circular, e o segundo faz uma *petitio principii*<sup>4</sup>. A conclusão apresentada é que:

Ao contrário da simultaneidade de eventos que ocorrem no mesmo ponto, a simultaneidade de

---

4 A petição de princípio é uma estratégia argumentativa logicamente inválida porque ela pressupõe, de maneira indireta, aquilo que pretende provar, em sua estrutura argumentativa.

eventos em dois pontos distantes não tem nenhum significado a priori: ela tem que ser definida por uma convenção (NUSSENZVEIG, 1998, p. 184).

Como discutido no segundo capítulo desta dissertação, a questão de se a definição de simultaneidade não local é, ou não, uma convenção foi exaustivamente debatida entre físicos e filósofos no início do século XX. Apesar de não ser possível estabelecer qual a influência filosófica de Nussenzweig (1998), ele claramente opta pela tese da convencionalidade, junto com Poincaré, Reichenbach e Max Jammer. E o autor ainda faz uma ressalva quanto à constância da velocidade da luz (segundo postulado), dizendo que “Veremos logo que ela tem um significado mais amplo, representando uma *velocidade limite para a propagação de quaisquer sinais*” (NUSSENZVEIG, 1998, p. 184).

Em seguida, Nussenzweig (1998, p. 184) enuncia a definição de simultaneidade do ponto médio, apresentada por Einstein em 1917. E para demonstrar a relatividade da simultaneidade, recorre a uma variante do exemplo do trem-estação, como é feito por Halliday, Resnick e Walker (2008b) e também por Sears *et al.* (2008b). Essa parece ser a definição mais popular, sendo utilizada por três das quatro coleções analisadas. Por último, Nussenzweig (1998, p. 185) compara a simultaneidade para Einstein (relativa) e para Newton (absoluta). E diz:

Entretanto, o instante de ocorrência de um evento era considerado como tendo caráter absoluto, o mesmo em qualquer referencial, o que também se aplicaria à simultaneidade de eventos distantes: daí a relação  $t'=t$ , na transformação de Galileu [...] Esse caráter absoluto do tempo na mecânica newtoniana seria justificável se existissem sinais de velocidade arbitrariamente grande (“instantâneos”). Na prática,  $c$  é tão grande comparado com velocidades macroscópicas típicas que a mecânica newtoniana é, para fins práticos, uma excelente aproximação (NUSSENZVEIG, 1998, p. 185).

Essa comparação é equivocada, como já foi discutido anteriormente na análise dos livros na mecânica pré-relativística. A noção de absoluto, para Newton, está relacionada com o tempo independente de processos físicos (independente de relógios, portanto).

Já para Nussenzweig (2002, 1998), e todas as outras referências aqui analisadas, **o tempo é aquilo que os relógios medem** (e dependente de processos físicos). Portanto, o sentido de absoluto que fica implícito é o de tempo medido igualmente para todos os relógios. É importante lembrar que, para Newton, a questão se os relógios medirão ou não o tempo igualmente (em conformidade com o tempo absoluto), é deixada em aberto. Logo, mesmo que relógios meçam o tempo de forma diferente, isso ainda não significa que o tempo deixe de ser absoluto. De forma mais clara, trata-se de um equívoco tentar **induzir o leitor a pensar que o tempo era considerado absoluto (no sentido newtoniano) porque desvios em sua medição não eram detectados, afinal, para Newton, relógios medem o tempo relativo (vulgar).**

Não se sugere que Nussenzweig desconheça o significado de absoluto em ambos os casos, mas sim que na exposição do conteúdo ocorreu a associação indevida e descuidada entre tempo absoluto (metafísico, newtoniano) e o tempo absoluto no sentido físico (que é igualmente medido por todos os relógios), como se fossem a mesma coisa (para Newton não é). Isso poderia ser evitado com o uso de uma abordagem historicamente contextualizada e sincretizada. Nesse caso, seria necessário discutir alguns aspectos da teoria do tempo de Newton e Barrow.

A compreensão deste ponto é importantíssima para que se possa entender o pleno estabelecimento de um novo quadro conceitual – o da Relatividade Restrita – em que considerações sobre a natureza do tempo (dependente, ou não dependente, de processos físicos) mudam. O tempo metafísico de Newton é herdeiro dos debates medievais que desvincularam o tempo e o movimento. Na Física Moderna, o tempo voltou a ser vinculado, de alguma forma, ao movimento (relativo entre referenciais inerciais).

Após a definição de simultaneidade ser apresentada, Nussenzweig (1998, p. 186) discute as transformações de Lorentz, seus efeitos cinemáticos e a lei de composição de velocidades. Quando aborda os efeitos cinemáticos das transformações de Lorentz, deduz uma expressão matemática que mostra a desigualdade de intervalos de tempo entre dois referenciais inerciais em movimento relativo, também apresentada como a dilatação dos intervalos de tempo. Nussenzweig recorre a outro fato experimental

Uma confirmação experimental de grande impacto desse efeito é a desintegração dos múons



(mésons  $\mu$ ) dos raios cósmicos, partículas carregadas análogas aos elétrons mas de massa cerca de 200 vezes maior [...] Observando a desintegração de múons em repouso no laboratório, pode-se medir sua vida média  $\tau_\mu$ , que é  $\approx 2,2 \times 10^{-6}$  s [...] Sabe-se, por outro lado, que múons são produzidos quando raios cósmicos colidem com núcleos ao penetrar na atmosfera da Terra, e uma fração apreciável deles chega até a superfície. Ora, durante uma vida média, mesmo viajando com velocidade  $v \sim c$ , um múon percorreria uma distância  $\sim c \tau_\mu \sim 3 \times 10^8 \times 2,2 \times 10^{-6} \text{ m} \approx 660 \text{ m}$ , em lugar de distâncias  $> 10 \text{ km}$ , como ocorre quando são produzidos na atmosfera. Como se explica a observação de uma fração apreciável dos múons após um número tão grande de vidas médias? A explicação é dada pela dilatação dos intervalos de tempo. A vida média  $\tau_\mu$  é no *tempo próprio*, no referencial de repouso do muon (NUSSENZVEIG, 1998, p. 196).

Nussenzveig argumenta que não se deveria observar muitos múons porque sua vida média é muito curta para que, ao serem produzidos na atmosfera, cheguem em grande quantidade até a superfície terrestre. Apesar deste fenômeno ser um forte argumento em prol da relatividade, ele não estava disponível para as considerações de Einstein, em 1905. A primeira evidência experimental em que se pode observar os efeitos da relatividade só ocorreu em 1919, em um eclipse solar, e estava ligada ao contexto da Relatividade Geral, proposta mais de uma década depois da Relatividade Restrita. Trata-se novamente do uso historicamente descontextualizado de evidências experimentais, que também leva a uma dessincretização do saber *por acidente*.

Por último, mas não menos importante, Nussenzveig (1998, p. 199) apresenta a questão da velocidade limite das interações da natureza no tópico em que trata do intervalo espaço-temporal ( $\Delta S^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - ct^2$ ) entre eventos. É importante ressaltar que o próprio conceito de intervalo espaço-temporal não vem do artigo inaugural de 1905, mas de contribuições posteriores à teoria.

Após discutir intervalos espaço-temporais do tipo tempo entre dois eventos, onde  $\Delta S^2 < 0$ , Nussenzveig explica que eventos separados

dessa maneira não podem ter ordem temporal de ocorrência modificada, em qualquer referencial inercial, pois *podem* possuir relação de causa e efeito. Um evento está no passado absoluto do outro, e vice versa. Assim sendo,

Vemos agora por que  $c$  não é apenas a velocidade da luz no vácuo, mas tem que ser a velocidade limite de propagação de qualquer sinal e de movimento de qualquer referencial: se assim não fosse, se admitíssemos a possibilidade de  $\beta > 1$  [velocidades supraluminais], seria possível violar o princípio da causalidade, invertendo a sucessão de causa e efeito! (NUSSENZVEIG, 1998, p. 200).

Apesar de não enunciar com mais clareza o que seria esse princípio, nem explicar a origem dele, Nussenzveig está justificando que o segundo postulado da Relatividade Restrita se estenda para todas as interações da natureza. O uso de uma abordagem historicamente contextualizada poderia complementar a argumentação apresentada ao leitor, explicitando quão forte este princípio é para a formulação inteligível de teorias na Física, e até mesmo sua participação em outras teorias sobre tempo (Leibniz e Kant).

Apesar de longa, a apresentação da estratégia geral de Nussenzveig (1998), na introdução à Relatividade Restrita, foi necessária para levantar o seguinte ponto: inicialmente, ele parece percorrer o mesmo caminho argumentativo que Einstein (1905), inclusive usando de diversas citações originais do artigo de 1905. Entretanto, ele o faz complementando com fatos experimentais posteriores, exemplos engenhosos e argumentação complementar. Considera-se que isso resulta em uma exposição muito clara dos **fundamentos físicos** da Relatividade Restrita e do conceito de simultaneidade.

É notável que esta coleção de Nussenzveig traga à tona duas concepções de tempo antagônicas (Newton e Einstein), tentando levar ao leitor a uma compreensão do desenvolvimento conceitual da Física, relativo ao conceito de tempo e simultaneidade. Entretanto, como não é proposta desta coleção ser historicamente contextualizada, não é surpresa que se encontre problemas com o contexto histórico apresentado, bem como dessincronizações. Considera-se que houve uma

discussão conceitual bastante clara com relação à simultaneidade, que poderia ser complementada com a apresentação do contexto histórico-filosófico do desenvolvimento do conceito de tempo e simultaneidade, de Newton até Einstein.

### 3.3 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES

A análise das obras feita nesse capítulo mostraram: (1) uso implícito do conceito de simultaneidade na mecânica pré-relativística, o que aumenta o efeito do processo de dessincretização do saber; (2) pouquíssima contextualização histórica acerca da evolução dos conceitos de tempo e simultaneidade; (3) falta de clareza da diferença entre o quadro conceitual da Mecânica Newtoniana e da relatividade, com relação aos conceitos de tempo e simultaneidade.

Um estudo de Alemañ Berenguer (1997) identificou e analisou oito concepções equivocadas comuns entre professores da educação básica espanhola, sobre a Relatividade Restrita, comparando com a literatura tanto da educação básica quanto universitária. Uma de suas conclusões é que o equívoco mais comum é interpretar fenômenos relativísticos em termos de concepções newtonianas. Por exemplo, uma das inadequações encontradas foi que

A relatividade é uma teoria que lida com os nossos processos de medição em condições extremas de velocidade ou energia. E uma vez que estamos preocupados com os efeitos relativísticos, não com o espaço e com o tempo em si, mas as nossas medidas deles, não temos razão que nos obrigue a mudar esses conceitos, com relação à física antes de Einstein (ALEMAÑ BERENGUER, 1997, tradução nossa).

Esta concepção provavelmente é reforçada por um ensino introdutório excessivamente focado nas equações de transformações de comprimento e intervalo de tempo (entre referenciais inerciais), e possuem origem “nas três primeiras décadas do século XX, no auge da filosofia operacionalista, que havia sido adotada por uma grande maioria de livros-texto que ignoravam o prejuízo didático que isso implica” (ALEMAÑ BERENGUER, 1997, tradução nossa). A influência da noção de “definição operacional”, com origem na filosofia de Bridgman,

foi identificada nos livros analisados neste capítulo.

No âmbito epistemológico, uma das concepções equivocadas identificadas por Alemañ Berenguer (1997) é a de que a relatividade nasceu da insatisfação dos resultados negativos dos experimentos de Michelson e Morley, que tentavam medir a velocidade de translação da Terra em relação ao éter. Essa simplificação histórica induz à visão empírico indutivista ingênua, como se um experimento com resultado negativo tivesse o poder, por si só, de derrubar uma teoria ou gerar uma inteiramente nova.

Em uma investigação mais recente, Arriassecq e Greca (2007) analisaram diversos aspectos de livros de física geral universitários que abordam a Relatividade Restrita. Com relação aos aspectos históricos e conceituais, encontraram os seguintes resultados:

- Contextualização histórica: analisaram se as bibliografias abordam o estado da Física antes do surgimento da Relatividade Restrita e o conceito de éter. Todas as bibliografias analisadas discutiram **parcialmente** esses dois tópicos.
- Discussões conceituais: analisaram se as bibliografias abordam os conceitos de espaço, tempo e simultaneidade, observador, movimento relativo e os paradoxos da relatividade. Neste caso, metade das bibliografias discutiram os tópicos apresentados, e a outra metade realizou discussões **esporádicas** sobre algum destes tópicos.

Arriassecq e Greca (2007) argumentam que uma profunda discussão sobre os conceitos de espaço, tempo e o papel que eles possuem na mecânica pré-relativística são fundamentais para que mais tarde possam ser reinterpretados no quadro conceitual da Relatividade Restrita. Com relação aos conceitos de tempo e simultaneidade, a análise feita neste capítulo apontou sérias deficiências dos livros nesse aspecto, como, por exemplo, o uso implícito do conceito de simultaneidade nos livros que abordam a mecânica pré-relativística.

Os resultados dos trabalhos de Alemañ Berenguer (1997) e Arriassecq e Greca (2007) apontam que as inadequações históricas, epistemológicas e conceituais encontradas nos livros de física geral universitários, referentes aos conceitos de tempo e simultaneidade, fazem parte de um quadro mais amplo de problemas identificados pela literatura no ensino de relatividade. É sob esse contexto que se propõe

um módulo de ensino histórico e filosoficamente contextualizado, sobre o desenvolvimento do conceito de simultaneidade (e tempo), que promova discussões conceituais e epistemológicas, compreendendo o período da Antiguidade até o início do século XX, no desenvolvimento da Relatividade Restrita.



## 4 MÓDULO DE ENSINO

Considerando o panorama levantado nos capítulos anteriores, este capítulo se propõe a realizar discussões que embasem teoricamente a construção do módulo de ensino, e apresentar sua estrutura e componentes. Os questionamentos norteadores desse capítulo são:

- Quais episódios, elencados na pesquisa histórica, devem ser selecionados para compor a narrativa histórica a ser abordada na intervenção didática?
- Que recomendações a literatura atual faz para a implementação de propostas de ensino envolvendo HFC?
- Como organizar e estruturar o conteúdo histórico selecionado, de modo a facilitar a resignificação do conceito de simultaneidade e a promoção de discussões epistemológicas?

### 4.1 - A TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Um dos objetivos deste trabalho de mestrado é realizar discussões conceituais acerca do conceito de simultaneidade, em uma disciplina de História da Física, que promovam uma resignificação desse conceito, com base na teoria construtivista-cognitivista da Aprendizagem Significativa (AUSUBEL, 2003). Para Ausubel, a aprendizagem de novos conhecimentos pode ocorrer de duas maneiras: *aprendizagem significativa e aprendizagem mecânica*.

A aprendizagem significativa acontece à medida que um novo conhecimento

é adquirido, atribuído, construído, por meio da interação com algum conhecimento prévio, especificamente relevante, existente na estrutura cognitiva do aprendiz. Interação é a palavra chave: interação entre conhecimentos novos e conhecimentos prévios. Se não há essa interação, não há aprendizagem significativa. Havendo interação, ambos os conhecimentos se modificam: o novo passa a ter significado para o indivíduo e o prévio adquire novos significados, fica mais diferenciado, mais elaborado (MOREIRA, 2008, p. 16).

Algumas condições precisam ser satisfeitas para que ocorra esse tipo de aprendizagem: (1) material de ensino potencialmente significativo, ou seja, que facilite a interação entre conhecimentos prévios e novos conhecimentos de forma não literal (substantiva) e não arbitrária (contextual); (2) conhecimento prévio, que seja relevante para interagir com o novo conhecimento, na estrutura cognitiva do aprendiz; (3) esforço deliberado do aprendiz para dar significado ao novo conhecimento, ou seja, intencionalidade na aprendizagem.

Já a aprendizagem mecânica ocorre quando novos conhecimentos são incorporados de maneira arbitrária (sem contexto) e literal (simples associação), “como se fossem informações a serem memorizadas, ao pé da letra, à estrutura cognitiva” (MOREIRA, 2008, p. 23). Por exemplo, a memorização de fórmulas, fatos históricos (e datas correspondentes), regras gramaticais, capitais de países ou estados brasileiros... sem interação com conhecimento prévio, sem busca de significado. Ocorre frequentemente quando estudantes decoram o conteúdo em véspera de prova, sem compreendê-lo.

Uma característica fundamental do conhecimento prévio do aprendiz é que ele possui certa organização hierárquica, de tal forma que os novos conhecimentos interagem com uma porção específica e relevante na estrutura cognitiva já existente, denominada de **subsunçor**. No processo de interação, os subsunçores ancoram o novo conhecimento. Os novos conceitos e ideias podem interagir de três maneiras distintas com os subsunçores: (1) quando o novo conhecimento é de ordem hierárquica inferior, sendo ancorado por subsunçores mais inclusivos e gerais, temos a aprendizagem subordinada; (2) quando o novo conhecimento é de ordem hierárquica superior, apresentando-se como uma síntese de diversos conceitos e idéias, ancorados em subsunçores menos inclusivos e gerais, temos a aprendizagem superordenada; (3) quando não há relação subordinada ou superordenada, a interação dá-se no mesmo nível de hierarquia, e a aprendizagem é dita combinatória.

A característica principal da obra *Concepts os Simultaneity* (JAMMER, 2006) é a de apresentar não um conceito mas **conceitos**, em diferentes contextos, geralmente associados a respectivos conceitos de tempo. A construção do módulo de ensino incorporará a mesma estratégia, ou seja, apresentará diferentes concepções de simultaneidade ao longo da história. É *provável* que a interação dos novos conhecimentos ocorra majoritariamente de maneira subordinada e combinatória, mas é importante ressaltar que não é objetivo deste



trabalho de mestrado fazer inferências sobre a aprendizagem dos alunos.

Outra questão que merece atenção é que aprendizagem significativa e aprendizagem mecânica não são mutuamente excludentes. Há entre elas um *continuum*, onde cada novo conhecimento ora pode ser apreendido mais significativamente, ora mais mecanicamente. Há uma “zona cinza” entre ambas. A aprendizagem mecânica não é necessariamente ruim, mas um ingrediente inerente ao processo educativo e impossível de eliminar. O que Ausubel prescreve é que a prática docente deve promover a aprendizagem mais significativa possível, pois ela é progressiva, “no sentido de que paulatinamente os significados, novos e preexistentes, vão se tornando mais claros, estáveis, diferenciados” (MOREIRA, 2008, p. 25). Isso significa que deslocar o foco da aprendizagem na direção da aprendizagem significativa requer também um planejamento de longo prazo. Se o aluno de graduação em Física estudou Mecânica Newtoniana nos primeiros semestres do curso, esse aprendizado se tornará significativo à medida que avança no curso, caso os novos conhecimentos interajam de forma não literal e não arbitrária com sua estrutura cognitiva. A aprendizagem de um determinado conhecimento (conteúdo) não se encerra em uma respectiva disciplina, mas deve continuar ao longo do processo educativo.

No contexto deste trabalho, chama-se de **ressignificação** o processo em que conhecimentos prévios (sobre o conceito de simultaneidade) adquirem novos significados, quando interagem com novos conhecimentos (o desenvolvimento histórico do conceito de simultaneidade). É incorporar novos significados ao conceito de simultaneidade, a partir de sua apresentação em novos contextos em que possuem importância histórica e científica (de forma não literal e não arbitrária). É nessa perspectiva que uma ressignificação do conceito de simultaneidade, utilizando a História da Ciência, é proposta.

Em relação aos dados gerados na aplicação do módulo de ensino, os indícios do processo de ressignificação são os comentários dos alunos que relacionem as concepções de simultaneidade próprias com as concepções apresentadas no texto, ou entre diferentes concepções de simultaneidade apresentadas em episódios históricos distintos.

O módulo de ensino, que será apresentado no capítulo seguinte, tem a intenção de ser um material didático potencialmente significativo. As discussões conceituais que serão promovidas na intervenção didática buscam ser um elemento facilitador para propiciar a interação não literal e não arbitrária entre os novos conhecimentos e aquilo que o aprendiz já

sabe sobre o tema.

Mas nesse caso, o texto base teria de ser elaborado considerando os conhecimentos prévios do público alvo? A resposta é positiva. Entretanto, não é proposta desta intervenção didática partir de uma análise detalhada destes conhecimentos prévios, pois isso extrapolaria os objetivos da pesquisa. Ainda assim, é possível trabalhar na perspectiva da aprendizagem significativa, pois

Os conhecimentos têm significado denotativos que são compartilhados por certa comunidade de usuários e os conotativos que são pessoais. Na aprendizagem significativa, o aprendiz inicialmente capta significados aceitos para os conhecimentos novos, mas então os internaliza ou reconstrói internamente, agregando aspectos idiossincráticos [pessoais] (MOREIRA, 2008, p. 16).

Não sendo possível considerar, de antemão, o aspecto conotativo, privilegia-se o significado denotativo (compartilhado) dos conceitos de tempo e simultaneidade como ponto de partida para a elaboração do módulo de ensino potencialmente significativo, que pode ser obtido através de uma *aproximação* com os conceitos de tempo e simultaneidade propagados nas coleções de física básica, pois: (1) esses cursos exercem grande influência na formação acadêmica (2) há consistência conceitual entre as bibliografias utilizadas nesta etapa da formação acadêmica, evidenciada pela análise feita no terceiro capítulo. Será na intervenção didática que os significados conotativos (pessoais), que cada aprendiz possui em sua estrutura cognitiva, que suscitados pela discussão, poderão vir à tona. A proposta de recontextualização histórica do conceito de simultaneidade, proposta neste trabalho de mestrado, busca combinar o desenvolvimento de um material didático potencialmente significativo com uma intervenção didática orientada para a prática docente construtivista, em ressonância com a base teórica utilizada.

O conceito de tempo sugerido pelas referências analisadas, conforme comentado no terceiro capítulo, é: **o tempo é aquilo que os relógios medem**. Trata-se de um tempo físico, que pode sofrer influência das condições físicas impostas aos relógios. Já o conceito de simultaneidade não local é derivado do conceito de tempo: **eventos**

**simultâneos são aqueles que ocorrem no mesmo tempo t de relógios sincronizados.** Esses conceitos são também intuitivos, pois a vida cotidiana moderna é regulada pelo relógio. As pessoas estão acostumadas a sincronizar eventos no espaço e no tempo quando obedecem horários para chegar ao trabalho, dormem, assistem a um programa de televisão, encontram um colega... Tais conceitos encontram ressonância no desenvolvimento histórico do conceito de simultaneidade, por exemplo: (1) método de Eratóstenes; (2) determinação das distâncias interplanetárias por Cassini. O módulo de ensino busca associar, de forma substantiva e não literal, as concepções apresentadas nos livros didáticos analisados, com outras concepções de simultaneidade em episódios históricos relevantes aos objetivos deste trabalho.

## 4.2 CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES

Uma discussão sobre a ciência pode ser feita de diversos ângulos. Segundo Martins (1999), na Filosofia da Ciência há três maneiras de se responder *o que é Ciência?*

- Empírica: tenta compreender a ciência a partir do que ela tem sido, ou seja, analisa a prática científica ao longo do tempo ou em uma determinada época. Recorre-se a estudos de historiadores e sociólogos da ciência. Não faz parte da Filosofia, é um tipo de investigação que cabe às disciplinas meta-científicas, como a História da Ciência.
- Axiológica: discute o que deveria ser a ciência, ou seja, é normativa. Faz juízo de valor sobre as práticas científicas, que nem sempre se adequam perfeitamente ao que deveriam ser. Não se baseia em fatos, mas estabelece valores do que seria uma boa prática científica. É um campo essencialmente filosófico, tal com a estética ou a ética.
- Analítica: a partir de um, ou mais, conceitos de ciência, tenta estabelecer o que pode, e o que não pode, ser ciência. Trabalha as questões de demarcação (limites da ciência). Também é uma questão essencialmente filosófica.

A proposta de intervenção didática segue a linha empírica, ou seja, pretende utilizar-se de episódios históricos do desenvolvimento do conceito de simultaneidade para discutir questões acerca da natureza da ciência. As discussões serão pautadas sobre o que tem sido a ciência, em contraposição às visões deformadas levantadas por Gil-Perez *et al.* (2001).

Outra questão importante a ser considerada é que um trabalho acadêmico, escrito por um historiador da ciência, quando dirigido a seus pares, provavelmente não é interessante, ou mesmo compreensível, ao aluno de graduação. Ainda porque este provavelmente carrega diversas visões deformadas do trabalho científico, e que poderão se chocar frontalmente com o conteúdo histórico. A didatização do conteúdo histórico torna-se desejável, na medida que (1) contempla uma proposta metodológica, planejada de acordo com o objetivos e o público alvo; (2) apresenta atividades didáticas para o aprofundamento; (3) pode incluir aspectos motivacionais e que estimulam o interesse verdadeiro pela aprendizagem (intencionalidade). Nesse caso, torna-se necessário discutir algumas questões acerca da elaboração do texto base, pois a necessidade de publicidade do conhecimento histórico requer que seu rigor seja amenizado por um processo de didatização, tornando-se um objeto de ensino adequado.

O conteúdo histórico proposto para compor o módulo de ensino compreende o período da Antiguidade até o início do século XX, com a formulação da Relatividade Restrita, portanto é bastante extenso. No estudo histórico feito no segundo capítulo desta dissertação, com base na obra de Jammer (2006), realizou-se uma primeira seleção de episódios históricos, descartando-se muitos de cunho puramente filosófico, e outros que possuem pouca relevância na Física. Mas para estruturar o texto base, ainda é necessário realizar-se uma segunda seleção de conteúdos.

Em primeiro lugar, deve-se privilegiar episódios que possuam maior potencial de contrapor as visões deformadas da ciência e de serem potencialmente significativos para a ressignificação do conceito de simultaneidade. Outra questão intimamente ligada à **seleção do conteúdo** é o **tempo didático**, ou seja, o tempo (em horas) disponível para: (1) realizar a intervenção didática, incluindo o desenvolvimento de alguma atividade; (2) o tempo necessário para a assimilação e compreensão do conteúdo histórico e filosófico apresentado ao aluno. Portanto,

É necessário selecionar episódios que permitam uma delimitação sem incorrer em narrativas muito superficiais. Nesse sentido, seria importante contemplar fatores que mostrem, ao menos, diferentes elementos envolvidos na construção do conhecimento científico, tanto internos à Ciência quanto contextuais, evitando incorrer em narrativas históricas enciclopédicas, anacrônicas e lineares (FORATO; PIETROCOLA; MARTINS, 2011).

O anacronismo ocorre quando se interpreta o passado fora de seu próprio contexto histórico, propositadamente ou não, utilizando conceitos, valores, ideias e crenças de outra época. O oposto é a abordagem diacrônica, em que as comparações devem ser feitas com as teorias do mesmo período, valores e ideias aceitas na época. Comparações entre diferentes períodos históricos não são proibidas, mas devem sempre ser feitas com cuidado para não se realizar julgamentos de valor ingênuos.

Um dos anacronismos mais conhecidos é o *whiguismo*, termo surgido na Inglaterra (BUTTERFIELD, 1931), onde a

história funcionava como um dispositivo político para legitimar a autoridade. Algum elemento do contexto histórico era negligenciado, fazendo parecer que um certo resultado foi inevitável [...]. A história da Ciência também pode exibir Whiguismo quando se apresenta uma teoria em particular, agora considerada correta, como se tivesse sido provada desde o início. Outras ideias, por exemplo, são enquadradas como se fossem concorrentes, em vez de trajetórias alternativas em um processo cego de tentativa e erro. A incerteza histórica é suprimida (ALLCHIN, 2004, tradução nossa).

Outro tipo de anacronismo, muito comum, é a reconstrução linear e ordenada de episódios históricos, com a finalidade de facilitar a aprendizagem de conceitos científicos. Ela esconde conflitos com o *paradigma científico* (KUHN, 1998) vigente, facilitando a formação de cientistas. Nessa abordagem, a História da Ciência é apresentada através

de episódios selecionados de tal forma que resultem naturalmente nas teorias atualmente aceitas. Essa historiografia também pode induzir a ideia de que a ciência possui certa sequência de passos bem definidos. Tanto a visão acumulativa e linear quanto a analítica (GIL-PEREZ *et al.*, 2001) encontram bons dispositivos de propagação.

Para evitar narrativas demasiadamente superficiais, deve haver um compromisso entre a quantidade de episódios abordados, a profundidade da abordagem e o tempo didático disponível. Episódios tratados muito superficialmente também dificultam a interação não literal e não arbitrária com a estrutura cognitiva do aprendiz, ou seja, dificultam a ressignificação do conceito de simultaneidade.

Para determinar o nível de aprofundamento, torna-se necessário realizar processos de **simplificação e omissão** nos conteúdos. Tão importante quanto os conteúdos selecionados, é o que se pretende omitir, pois facilmente se pode induzir visões deformadas ou incorrer em algum anacronismo. A necessidade de omitir lança um dilema: **omissão versus distorção**. Quais aspectos sociais, culturais ou científicos podem ser considerados desnecessários para atingir os objetivos pedagógicos? O que torna um aspecto histórico essencial para alcançar o objetivo pretendido? Segundo Forato, Pietrocola e Martins (2011), é preciso apresentar uma quantidade mínima de detalhes significativos relacionados com a elaboração de uma teoria ou observação dos fenômenos. Neste caso, a narrativa histórica concentra-se nos objetos principais da discussão: (1) as visões deformadas do trabalho científico; (2) O conceito de simultaneidade, em diferentes contextos.

Outro dilema difícil é o da **extensão versus profundidade**. É opção deste trabalho apresentar um enfoque histórico amplo, devido à pouca discussão encontrada sobre o conceito de simultaneidade nas coleções de física básica universitárias e a riqueza histórica deste conceito. Dado que há uma profundidade mínima para cada episódio histórico, para que não seja abordado superficialmente e incorra em distorções, será necessário limitar a quantidade de episódios históricos a fim de respeitar o tempo didático, buscando uma relação de compromisso entre extensão e profundidade.

Além da preocupação com a seleção, delimitação e estruturação da narrativa histórica, é preciso buscar uma forma adequada de apresentação do conteúdo, que neste caso abrange a Física, a História e a Epistemologia, ou seja, é multidisciplinar.

A Teoria da Flexibilidade Cognitiva (SPIRO *et al.*, 1992), que foi

desenvolvida inicialmente para o contexto das ciências médicas nos Estados Unidos, e que tem o foco em conhecimentos complexos e multidisciplinares, sugere (entre muitas outras coisas) que a aprendizagem é facilitada quando o conteúdo é apresentado através de múltiplas representações, como: exposição oral, animações, simulações de júris, debates, histórias em quadrinhos, vídeos, entre outros, pois ajudam a promover a compreensão conceitual e a habilidade de transpor o saber para novos contextos. No caso específico deste trabalho, optou-se pelo uso da exposição oral, debates, texto escrito, figuras e animações.

É importante dar atenção para as definições operacionais do conceito de simultaneidade, feitas por Santo Agostinho, Poincaré e Einstein, pois se tratam de processos dinâmicos, não estáticos. Segundo Lowe (2004), muitos pesquisadores em educação acreditam que as animações sejam ferramentas mais eficazes que as imagens estáticas, visto que elas podem representar os processos dinâmicos diretamente. Já no uso de imagens estáticas e esquemas, a sequência temporal tem que ser indicada pelo uso de símbolos adicionais, como setas ou sequência de imagens, que exigem grande esforço do aprendiz na criação da representação mental, dificultando o entendimento da explicação do fenômeno.

Em uma busca por animações na temática da relatividade, encontrou-se trinta e um objetos virtuais de aprendizagem em uma pesquisa no Banco Internacional de Objetos Educacionais, que pode ser acessado através de um sítio<sup>5</sup> do Ministério da Educação do Brasil (MEC). Refinando a busca por animações que abordem tempo e simultaneidade, restaram 8 opções que poderiam ser utilizadas no módulo de ensino. Como selecionar as animações mais adequadas? Quais características são importantes para a melhor efetividade das mesmas?

Em um estudo empírico sobre uso de animações, O'Day (2006) sugere que as animações devem: (1) ser narradas em tom de conversa normal (MAYER e ANDERSON, 1992; SWELLER, 1994; LOWE, 2003; MAYER, 2003); (2) textos e nomes devem ser destacados quando mencionados durante a narração (MAYER, 2003); (3) apresentar um grau adequado de aprofundamento, sem conter detalhes demais, pois podem resultar em excesso de informação para ser assimilada pelo

---

5 Disponível em: <<http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/>>. Acessado em julho 2014.

espectador (TVERSKY e MORRISON, 2002); (4) ter capacidade de parar, voltar e adiantar a sequência temporal (TVERSKY e MORRISON, 2002); (5) usar sinais visuais, como mudança de cor ou forma, para sinalizar um evento relevante na animação (O'DAY, 2006).

Foram selecionadas duas animações para uso no módulo de ensino, levando em conta os critérios acima mencionados, ambas sobre o conceito relativístico da simultaneidade. Nenhuma animação com aspectos relativos à definição operacional de Santo Agostinho ou de Poincaré foi encontrada.

#### 4.3 ESTRUTURA E COMPONENTES DO MÓDULO DE ENSINO

Considerando a necessidade da didatização do conteúdo histórico, e os aspectos ligados à seleção, delimitação e estruturação da narrativa histórica, optou-se por organizar o módulo de ensino nos seguintes tópicos:



Tabela 6: Estrutura do módulo de ensino.

| <b>Tópico</b>   | <b>Episódios históricos</b>   |
|---|---|
| Antiguidade: as primeiras concepções de tempo e simultaneidade.             | O tempo para Parmênides e Aristóteles; paradoxos de Zenão, a simultaneidade aristotélica, a tese da simultaneidade visual; as refutações da Astrologia por Sexto Empírico e Santo Agostinho.    |
| A Idade Média e Renascença: a unicidade do tempo.                           | Os escolásticos medievais e a unicidade do tempo (Afrodísia, Avicena, Averroes, Ockham); a Renascença e a inversão ontológica do tempo sobre o movimento (Telesio e Patrizi, Suarez, Gassendi). |
| Simultaneidade nas medições: um conceito subjacente.                        | O método de Eratóstenes; o método de Gemma; a evolução do cronômetro marítimo; a medição da velocidade da luz por Roemer; a determinação das distâncias interplanetárias por Cassini.           |
| Física Clássica: Newton e o tempo absoluto.                                 | O tempo e simultaneidade absolutos de Barrow e Newton.  |
| Física Clássica: críticas à Newton e o princípio da antecendência da causa. | As críticas de Leibniz e Kant à Newton; o princípio da antecendência da causa; o convencionalismo de Poincaré.  |
| A simultaneidade na Relatividade Restrita.                                  | Breve gênese da Relatividade Restrita; definições de simultaneidade em 1905 e 1917; a tese da convencionalidade.  |

Fonte: elaborada pelo autor.

Algumas observações são pertinentes. Em primeiro lugar, os episódios foram agrupados tanto pela proximidade cronológica quanto pela *natureza* do assunto que tratam. O primeiro tópico, que cobre o período da Antiguidade, destina-se a introduzir o assunto e apresentar as primeiras questões acerca do desenvolvimento do conceito de simultaneidade. Tanto questões teóricas, como a concepção aristotélica de tempo e simultaneidade, a tese da simultaneidade visual e os paradoxos de Zenão, quanto questões empíricas, como as refutações da Astrologia de Sexto Empírico, são abordadas.

O segundo tópico aborda a Idade Média, e apresenta essencialmente discussões conceituais sobre o conceito de tempo. Elas evidenciam certos aspectos importantes do desenvolvimento da ciência, tais como (1) rupturas com o conhecimento anterior; (2) a noção de problema conceitual interno; (3) aparecimento da primeira concepção absoluta de tempo.

Agrupou-se, no terceiro tópico, os principais episódios históricos relacionados à medição de distâncias em que o conceito de simultaneidade possui papel fundamental. O período histórico é amplo, desde a Antiguidade até a Renascença. Há prevalência de discussões conceituais, principalmente por conta da noção de simultaneidade como eventos que ocorrem entre observadores com relógios sincronizados, como nos métodos de Eratóstenes e de Gemma. Um aspecto epistemológico muito importante é apresentado: a não neutralidade social da ciência, em especial no âmbito econômico das Grandes Navegações.

No período da Renascença, o quarto tópico reúne o desenvolvimento teórico que culminou com o paradigma newtoniano de espaço e tempo absolutos. No quinto tópico estão reunidas as principais críticas às concepções newtonianas, que foram feitas por Leibniz, Kant e Poincaré. É apresentado um rico contexto científico e filosófico no período que separa Newton de Einstein, em contraposição às omissões dos livros de física geral, analisados no terceiro capítulo dessa dissertação.

No último tópico, dá-se especial atenção à simultaneidade na Relatividade Restrita. Um aspecto interessante é que Einstein formulou e reformulou a definição de simultaneidade diversas vezes. Além de apresentar minuciosamente as duas principais definições de simultaneidade, a principal questão epistemológica e conceitual discutida é se, na relatividade, a simultaneidade é ou não uma convenção.

O componente principal do módulo de ensino é um texto base, que possui 43 páginas, onde a narrativa histórica foi construída conforme a estrutura comentada anteriormente e as discussões apresentadas nos capítulos anteriores. Para auxiliar na compreensão do conteúdo, elaborou-se uma apresentação de slides, com a finalidade de facilitar a exposição oral do conteúdo do texto base e instigar as discussões conceituais e epistemológicas. As duas animações selecionadas estão incorporadas nesta apresentação. O texto base é apresentado na íntegra no próximo capítulo, e os aspectos metodológicos da aplicação e avaliação no capítulo seguinte ao texto base.



## 5 TEXTO BASE

### 5.1 - INTRODUÇÃO

Os livros didáticos de Física utilizados na educação formal, tanto do nível médio quanto universitário, raramente dão ênfase ao conceito de simultaneidade. A exceção geralmente ocorre quando tais livros abordam a Relatividade Restrita, de Albert Einstein (1905). A relatividade da simultaneidade, proposta por Einstein nesta teoria, é sempre um fato destacado nos livros como uma mudança na forma de compreender a realidade física. Tanto nos livros didáticos quanto em obras de divulgação científica, diversos exemplos costumam ser evocados para evidenciar essa mudança, como os paradoxos dos gêmeos e do celeiro. Esses paradoxos contrapõem-se fortemente ao senso comum, estimulam acalorados debates em torno da teoria, e acabam contribuindo para a popularização da relatividade. Segundo o físico e historiador da ciência Max Jammer, a elaboração deste conceito é muito mais antiga do que se imagina.

A noção de simultaneidade já estava na mente da humanidade antes mesmo de sua articulação consciente, quando na aurora da civilização o homem pré-histórico observou as estrelas no céu e pensou que elas estivessem onde ele as viu, e concebeu a ideia de um onipresente "agora". Com esta concepção, sua mente implicitamente deduziu a noção de simultaneidade não-local como um componente necessário do seu processo mental de distinguir a si mesmo do mundo que o rodeava (JAMMER, 2006, p. 16, tradução nossa).

Dada a relevante contribuição da noção de simultaneidade na construção de uma imagem física da realidade, esse conceito torna-se particularmente importante, tanto na Física quanto na Filosofia. No desenvolvimento da Física, a noção de simultaneidade esteve presente desde a Antiguidade grega e tem papel fundamental na física moderna. O presente texto tem por objetivo contextualizar o desenvolvimento histórico do conceito de simultaneidade e promover discussões tanto conceituais quanto epistemológicas relativas a esse tema.

No âmbito epistemológico, espera-se contribuir para a formação

de uma imagem da ciência mais fidedigna e humanizada entre futuros físicos e professores. Já as discussões conceituais visam fomentar uma melhor percepção do papel do conceito de simultaneidade em diversos momentos históricos importantes no desenvolvimento da Física, como os paradoxos de Zenão, a determinação da longitude pelo método de Gemma e a primeira medição da velocidade da luz por Olaf Roemer.

A maioria das concepções de simultaneidade surgidas na história da humanidade está intimamente ligada ao conceito de tempo. Dessa forma, não é possível separar o desenvolvimento histórico destes dois conceitos sem trazer prejuízo a um entendimento integrado e coerente do tema. Assim, apresenta-se o desenvolvimento de ambos os conceitos, embora as discussões estejam mais concentradas no conceito de simultaneidade.

Antes de iniciar uma jornada através de dois milênios, faz-se necessário diferenciar duas concepções distintas de simultaneidade. A primeira é a *simultaneidade local*, que versa sobre eventos no mesmo local ou imediações espacialmente contíguas, onde a distância entre os mesmos é insignificante para os propósitos de análise. A segunda é a *simultaneidade não-local*, que é utilizada para analisar a ocorrência de eventos distantes. É particularmente sobre esta segunda concepção que vão estar centradas as discussões a seguir.

## 5.2 – ANTIGUIDADE: AS PRIMEIRAS CONCEPÇÕES DE TEMPO E SIMULTANEIDADE

A essência e a existência do tempo foram debatidas no mundo ocidental desde a Antiguidade grega. Para o filósofo pré-socrático Parmênides de Eléia (530 - 460 a.C.), **o tempo é uma ilusão**. Tal conclusão é baseada em suas especulações ontológicas sobre a realidade, nas quais se pode destacar o princípio da identidade: “*aquilo que é, é; lhe é impossível não ser*” (WHITROW, 1993, p. 56). Para ele, as mudanças observadas pelos seres humanos no mundo sensível não podem ser reais; são ilusões, pois o Ser (aquilo que existe) não pode ter propriedades contraditórias. Por exemplo, uma pedra que esquentava ao sol e esfriava à noite não pode ser um fenômeno real, pois ela não pode *ser* e *não-ser* quente (ou fria), pois violaria o princípio da identidade. Assim sendo,

Parmênides propôs uma distinção básica entre o mundo da aparência, caracterizado pelo tempo e a

mudança, e o mundo da realidade, imutável e atemporal. O primeiro é revelado pelos sentidos, mas estes são enganosos. O segundo nos é revelado pela razão e é o único modo verdadeiro de existência (WHITROW, 1993, p. 56).

A conclusão é que o tempo é irreal, uma ilusão causada pelo mundo dos sentidos. O tempo só pode ser um presente contínuo; passado e futuro não possuem significado. Por conta dessa posição, Parmênides não fez uso explícito da noção temporal de simultaneidade. Além do tempo, o movimento também é ilusório, como se verá mais adiante.

O filósofo grego que realizou o mais profundo tratamento da noção de tempo e simultaneidade foi Aristóteles de Estagira (384 - 322 a.C.) – considerado como um dos maiores filósofos da humanidade pela qualidade de suas contribuições em diversas áreas do conhecimento, como ética, política, biologia, astronomia e física. Segundo este filósofo, o ser humano se dá conta da passagem do tempo somente quando há mudança no estado de sua mente, quando tem consciência do *antes* e *depois*. O tempo pode ser entendido justamente como o processo de contagem do *antes* e do *depois*. Tempo e movimento possuem uma relação de reciprocidade.

Não apenas medimos o movimento pelo tempo, mas também o tempo pelo movimento, porque eles se definem um ao outro. O tempo marca o movimento, visto que é seu número, e o movimento marca o tempo (ARISTÓTELES, apud WHITROW, 1993, p. 57).

O tempo é o número do movimento, e o movimento dos céus fornece uma medida perfeita do tempo, pois é circular, uniforme e incessante. Entretanto, apesar da eternidade do movimento celeste, o fluxo do tempo não depende deste movimento. Para Aristóteles, o movimento de um corpo pode cessar, mas não o fluxo do tempo, que é permanente.

Aristóteles foi o primeiro filósofo ocidental a elaborar uma definição para a noção de simultaneidade. Uma das definições encontra-se na obra *A Física*, que diz: “a simultaneidade no tempo, e não sendo antes ou depois, significa coincidindo e estando no próprio agora em que

coincidem” (ARISTÓTELES, apud JAMMER, 2006, p. 38, tradução nossa.). Em outras palavras, eventos simultâneos são aqueles que ocorrem (coincidem) no mesmo *agora*. Segundo Aristóteles, o tempo é composto de *agoras*, que dividem, mas também ligam, o passado e o presente. É inaceitável a existência de eventos instantâneos, mesmo que os eventos sejam rápidos demais para serem percebidos pelos sentidos humanos. O agora possui duração, mesmo que muito curta. Outro ponto importante é que a sucessão de *agoras* que forma o tempo não é discreta, mas contínua. Esse fato será particularmente importante nos paradoxos de Zenão contra o movimento.

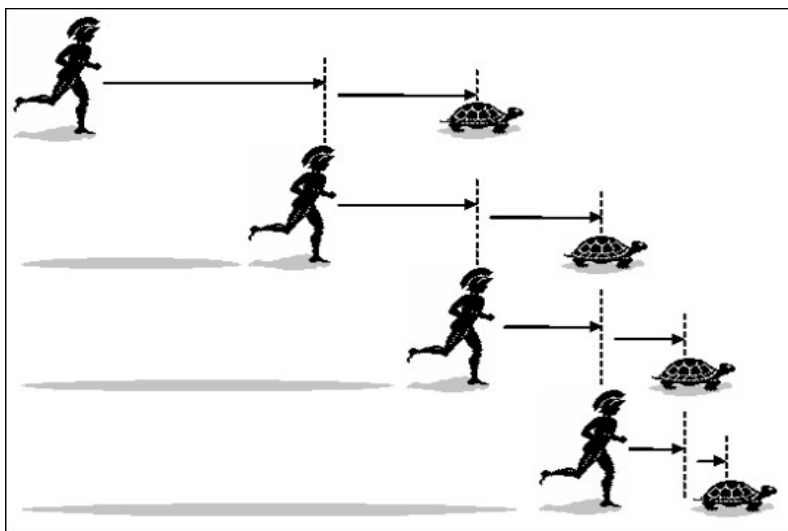
Zenão de Eléia (495 - 430 a.C.) foi discípulo de Parmênides e um dos primeiros a utilizar uma estratégia argumentativa chamada *reductio ad absurdum* (redução ao absurdo). Ela consiste em assumir hipoteticamente os pressupostos do interlocutor e, através do raciocínio lógico, chegar até um fato evidentemente falso ou contraditório. Nesse caso, conclui-se que alguma das premissas do interlocutor é falsa e, por implicação, igualmente falsa a tese do interlocutor. Valendo-se dessa estratégia, Zenão elaborou quatro paradoxos contra o movimento, que na filosofia de Parmênides é tão ilusório quando o tempo. Desses quatro paradoxos, dois deles fazem uso implícito da noção temporal de simultaneidade: *Aquiles e a Tartaruga* e o *Estádio*.

Em *Aquiles e a Tartaruga*, Aquiles (um personagem da mitologia grega) e a Tartaruga apostam uma corrida, com a Tartaruga largando à frente, mas movendo-se mais lentamente que Aquiles. Enquanto Aquiles se movimenta para a direita, a fim de alcançar a posição inicial da Tartaruga, a Tartaruga se move também no mesmo sentido. Isso se repete em cada estágio, isto é, Aquiles sempre procura chegar onde se encontra inicialmente a Tartaruga, mas, entretanto, esta se afasta dessa sua posição inicial. Uma análise imediata indica que seria preciso um processo infinito de estágios até que Aquiles pudesse alcançar a Tartaruga, o que não pode ser cumprido em um tempo finito. Assim sendo, Zenão argumenta que a Tartaruga nunca será alcançada, o que contraria a experiência do mundo sensível.

Neste paradoxo, assume-se implicitamente que tanto Aquiles quanto a Tartaruga iniciam a corrida *ao mesmo tempo*, mas de lugares diferentes. Adicionalmente, a cada estágio da disputa, ambos chegam e partem também *ao mesmo tempo*, denotando o uso do conceito de simultaneidade não-local infinitas vezes.



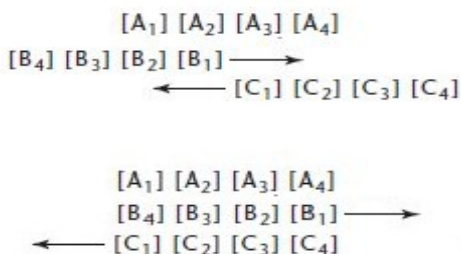
Figura 5: Aquiles e a Tartaruga.



Fonte: desconhecida.

Já o paradoxo *Estádio* é mais elaborado que o anterior. Inicialmente, tem-se uma fileira de objetos AAAA, parada no meio de um estádio. Próximos a ela, e também estacionárias, encontram-se duas outras fileiras BBBB e CCCC. Todas elas possuem o mesmo tamanho. As fileiras B e C partem **simultaneamente**, do ponto médio da fileira A, em sentidos opostos (Figura 2a) e com a mesma velocidade (em módulo). Dada a simetria do problema, B1 e C1 alcançam as extremidades opostas de A **simultaneamente**, como mostra a figura a seguir.

Figura 6: Estádio.



Fonte: adaptado de JAMMER, 2006, p. 28.

Para analisar as consequências desta situação, Zenão supõe inicialmente que **o tempo** que uma fileira qualquer leva para ultrapassar outra fileira **é sempre o mesmo**, independente da fileira estar parada ou em movimento. Então  $B_1$ , gastando um certo tempo  $t$ , cruzará toda a fileira C. Neste processo, ele também terá cruzado meia fileira A, logo, gastando apenas metade do tempo  $t$ . O mesmo ocorre para  $C_1$ , gastando o mesmo tempo  $t$  para atravessar toda a fileira B, mas metade deste mesmo tempo para atravessar meia fileira A. A conclusão de Zenão é que metade do tempo é igual a todo ele. Essa contradição mostraria que o movimento é impossível.

A suposição inicial de Zenão já faz uso da noção de intervalo simultâneo. Além disso, há o uso explícito da noção de simultaneidade não-local. Aristóteles argumenta que o erro de Zenão, neste paradoxo, está na suposição inicial, que é falsa.

Os paradoxos de Zenão, no qual o conceito de simultaneidade desempenhou papel importante na argumentação, possuem grande importância para o desenvolvimento da Física, pois foram palco para a discussão de duas concepções distintas sobre a essência e a existência da realidade do tempo e do movimento, entre dois grandes filósofos da Antiguidade, Parmênides e Aristóteles. A influência desses paradoxos não se limitou a este período histórico, já que, segundo o filósofo e matemático Bertrand Russell, os paradoxos de Zenão “formaram os degraus para todas as teorias sobre espaço e tempo infinito criadas desde aquele tempo até os dias atuais” (RUSSELL, 1926, p. 183, tradução nossa).

Os paradoxos de Zenão são **experimentos mentais**, raciocínios lógicos dedutivos realizados a partir de *hipóteses empíricas*, como o da corrida entre Aquiles e a tartaruga. Os experimentos mentais são utilizados, por exemplo, quando a situação proposta não é realizável; ou quando não é necessário um meio físico para se chegar às conclusões pretendidas. As hipóteses empíricas contidas na formulação dos experimentos mentais contém, ao menos implicitamente, suposições teóricas prévias. Em Aquiles e a Tartaruga, pressupõe-se que não é possível deslocar-se em um espaço infinitamente dividido em um tempo finito. Em o Estádio supõe-se que o intervalo de tempo entre a passagem das fileiras é o mesmo, independente de qual fileira está sendo ultrapassada. Suposições prévias não estão presentes apenas em experimentos mentais; são necessárias também em qualquer situação empírica realizável.

A noção de simultaneidade também desempenha papel importante na teoria da luz e visão de Aristóteles. Sucintamente, para este filósofo a luz é uma ação causada por uma substância incandescente (ígneia), que altera um meio transparente, possibilitando a visão. A luz não seria algo material, nem o movimento de algo, como é o som; ela não viaja em um meio. Na propagação da luz, o meio é modificado todo de uma vez, de um só golpe, como o congelamento da água. **A propagação da luz e, conseqüentemente, a percepção visual dos acontecimentos, são processos instantâneos.** Tal característica da visão é conhecida como a *Tese da Simultaneidade Visual*. Ela é compatível com a experiência cotidiana, e

mesmo que não seja explicitamente afirmada e apenas inconscientemente aceita, foi sem dúvida (e ainda é), em geral, não favorável à busca de uma definição operacional de simultaneidade. Além disso, por causa dessa tese todo mundo tomou a noção de simultaneidade [visual] por certa (JAMMER, 2006, p. 43, tradução nossa).

Isso significa que fenômenos da natureza, como o nascer do sol ou a explosão de uma supernova, e a sua observação pelos olhos de uma pessoa, são fenômenos simultâneos. Por conta da influência de Aristóteles nos séculos seguintes, essa tese persistiu por toda a Idade Média.

A maioria dos filósofos entende que o conceito de tempo

aristotélico é mais primitivo que o de simultaneidade. É a partir da noção de tempo que se deriva o conceito de simultaneidade, logo o tempo possui prioridade lógica sobre a simultaneidade. Mas alguns filósofos, como David Bostock, discordam. Ele argumenta que “o conceito de simultaneidade é um conceito temporal primitivo que é utilizado [por Aristóteles], e não explicado” (BOSTOCK, 1980, apud JAMMER, 2006, p. 40, tradução nossa.). Em quase todos os episódios históricos que serão abordados mais adiante, o conceito de simultaneidade é derivado de alguma concepção primitiva de tempo. Entretanto, a questão de qual conceito é mais fundamental será retomada mais tarde.

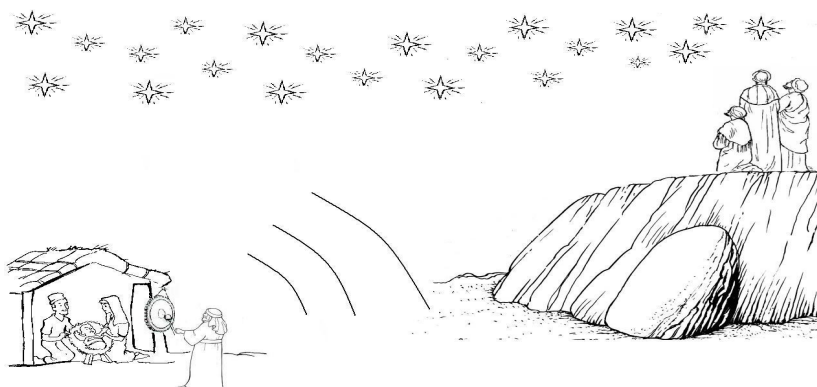
Um século depois de Aristóteles, em Alexandria, viveu o médico e filósofo Sexto Empírico (160-210 d.C.). Influenciado pelo ceticismo pirrônico<sup>6</sup>, Sexto Empírico se opunha fortemente à Astrologia, que estava ganhando muitos adeptos na época em que viveu. As bases da Astrologia foram desenvolvidas pelos babilônios e caldeus, mas foi no período helenístico, compreendido entre 323–146 a.C., quando ocorreu a maior propagação da cultura grega no mediterrâneo, que a Astrologia se difundiu. Para determinar o horóscopo, os astrólogos necessitavam conhecer o signo ascendente, que é indicado pela constelação que está nascendo no céu (no leste), no momento em que o bebê vem ao mundo. Sexto Empírico descreve o evento:

à noite, o caldeu sentou-se em um local alto para ver as estrelas, enquanto outro homem sentou-se ao lado de uma mulher em trabalho de parto até que a criança nascesse; o momento do nascimento deveria ser comunicado imediatamente ao homem que estava na montanha pelo som de um gongo; quando o homem escutasse o gongo, ele perceberia o signo ascendente (EMPIRICO, 1961, p. 334–335 apud JAMMER, 2006, p. 19, tradução nossa).

- 
- 6 O ceticismo pirrônico é uma escola filosófica fundada por Enesidemus, no primeiro século da era cristã. Ele foi influenciado por Pirro de Éllis, que viveu no período helenístico, três séculos antes. Esta escola defende que o conhecimento deve sempre ser posto em dúvida, que não é possível ter certeza de coisa alguma. Portanto, nosso juízo deve estar em eterna suspeição. As obras originais de Enesidemus foram perdidas, o que se conhece deste filósofo advém principalmente dos registros de Sexto Empírico.

A noção da simultaneidade é fundamental, pois para fazer o horóscopo é necessário determinar a simultaneidade não-local de dois eventos: o nascimento do bebê e da constelação que está surgindo no leste. Para refutar a Astrologia, Sexto Empírico demonstrou que o sinal do gongo demora um certo tempo para alcançar o topo da montanha. Para isso, ele recorreu ao fato de que, ao observar a derrubada de uma árvore à distância, é possível notar o golpe do machado antes de ouvir seu som. A velocidade do som não era conhecida, mas o argumento de Sexto Empírico não necessita desta informação. É suficiente apenas a constatação de que o som demora um intervalo de tempo para se propagar. Ele conclui: “nós provamos que a simultaneidade exata entre o nascimento e a tomada do horóscopo não pode ser obtida” (EMPÍRICO, 1961, p. 367 apud JAMMER, 2006, p. 21, tradução nossa).

Figura 7: Sexto Empírico e a refutação da Astrologia.



Fonte: elaborada pelo autor.

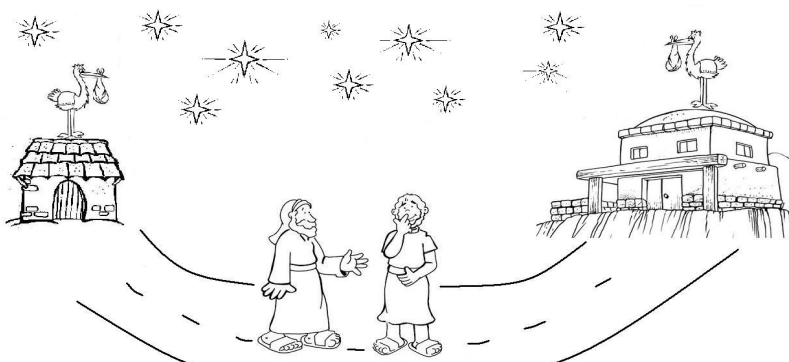
Aplicando o princípio filosófico do ceticismo pirrônico, e do próprio Sexto Empírico, que é duvidar das coisas incessantemente, pode-se contra argumentar que: (1) Conhecendo a velocidade do som, e a distância até o topo da montanha, é possível descontar o tempo de propagação do sinal sonoro, estabelecendo a simultaneidade exata. Entretanto, a velocidade do som só foi determinada pela primeira vez aproximadamente em 1630, por Marin Mersenne; (2) O movimento do céu é muito lento, enquanto o do som é muito mais rápido; portanto, o tempo de propagação do som é irrelevante (pode ser desprezado) para a determinação da simultaneidade.

Apesar dos contra argumentos que podem ser levantados, Sexto Empírico merece reconhecimento pela originalidade de ter criticado o método de transmissão do sinal para refutar a Astrologia. O cerne de seu argumento é justamente mostrar que não é possível estabelecer a simultaneidade de eventos utilizando sinais sonoros, sem levar em conta o tempo de transmissão desse sinal.

Outro filósofo que criticou a Astrologia, também usando a noção de simultaneidade, foi Santo Agostinho de Hipona (354-430 d.C.). Ele foi uma das pessoas mais importantes para a difusão do cristianismo no ocidente e embora tivesse praticado Astrologia na juventude se converteu em um dedicado opositor desta arte. Em sua obra *Confissões* ele conta uma história que fundamenta sua descrença na Astrologia. Tudo começa com uma mulher rica e sua escrava, que engravidaram ao mesmo tempo. Seus maridos contaram os dias, as horas e até frações de hora a fim de determinarem o momento exato do nascimento, e consequentemente obter o horóscopo.

Quando as duas mulheres começaram a sentir as dores do parto, o pai de Firmino e seu amigo notificaram um ao outro o que se passava nas respectivas casas; os mensageiros estavam a postos para levar informações, de uma casa para a outra, assim que o parto real fosse constatado. Cada um na sua província tomou as devidas providências para que a notificação fosse imediata. Ocorreu então que os mensageiros das respectivas casas se encontraram, disse ele, num ponto exatamente equidistante das duas casas, de modo que nenhum dos dois pôde calcular nenhuma diferença na posição dos astros e nenhum outro detalhe divergente (AGOSTINHO, 2013, p. 118).

Figura 8: Santo Agostinho e a refutação da Astrologia.



Fonte: elaborada pelo autor.

Na sequência da história, Agostinho observa que o filho da senhora viveu na riqueza, enquanto o filho da escrava teve o mesmo destino da mãe. Pelo registro dessa história, em que duas crianças com o mesmo horóscopo tiveram destinos tão diferentes, ele argumenta ter refutado a Astrologia. A noção de simultaneidade está subjacente ao fato de que ambos os bebês nascem *no mesmo instante*, por isso possuem o mesmo horóscopo.

O importante nessa história é o método que Agostinho usou para determinar a simultaneidade dos nascimentos: dois mensageiros partem de casas diferentes, um ao encontro do outro. Para que o método possa funcionar, está implícito que ambos deslocam-se com a mesma velocidade (em módulo). Segundo Max Jammer,

O método descrito por Agostinho pode muito bem ser considerado como provavelmente o mais antigo exemplo registrado de uma definição operacional, ou a verificação da simultaneidade não local, mesmo que ainda carecesse de alguma elaboração [mais profunda]. Na verdade, pode ser considerado como uma antecipação da definição operacional da simultaneidade não local de Einstein (JAMMER, 2006, p. 49, tradução nossa).

No argumento de Sexto Empírico contra a Astrologia, a tese da

simultaneidade visual é uma suposição teórica assumida implicitamente. É justamente a diferença do processo da visão (instantâneo) com o sinal sonoro (não instantâneo) que gera o argumento principal de Sexto Empírico. Mas quando sinais luminosos não estão em jogo (não podem ser usados), como no método de Santo Agostinho, o estabelecimento da simultaneidade se torna um problema suficientemente complexo, exigindo a elaboração de uma definição operacional. Esse método é muito semelhante a uma das definições de simultaneidade de Einstein, que será discutida mais adiante.

A validade da Astrologia era um problema importante na Antiguidade. As refutações da Astrologia, por Sexto Empírico e Santo Agostinho, ilustram a ligação entre a resolução de problemas e o avanço no conhecimento da humanidade. O caráter problemático da ciência tornar-se-á ainda mais notório durante a Renascença.

A Antiguidade termina sem um consenso sobre o conceito de tempo. Diversos filósofos elaboram ideias conflitantes, como Parmênides e Aristóteles. O conceito de simultaneidade, apesar de estar envolvido em problemas importantes da Antiguidade, foi tratado teoricamente apenas por Aristóteles, e sem receber grande destaque.

### 5.3 – A IDADE MÉDIA E RENASCENÇA: A UNICIDADE DO TEMPO

Os escolásticos medievais dos séculos X e XI concordaram, de modo geral, com a teoria aristotélica do tempo. Mas aceitaram, com grandes reservas, a justificativa dada por Aristóteles em favor da unicidade do tempo. Segundo a concepção aristotélica, o tempo é o número do movimento. Mas se existem inúmeros corpos que se movimentam no universo, eles se movimentam em relação a um único tempo, ou existe uma pluralidade de tempos, um para cada movimento? Aristóteles examinou essa questão em sua teoria. Segundo ele, a pluralidade dos movimentos não implica em uma pluralidade de tempos. O tempo não é o número de um movimento em particular, mas de todos os movimentos. Mas os escolásticos medievais, analisando a teoria como um todo, interpretaram Aristóteles da seguinte maneira: a definição aristotélica possibilita a existência de intervalos de tempos iguais, mas não que o tempo de acontecimentos simultâneos seja o mesmo. A questão de que se o tempo é um só, ou se existe uma pluralidade de tempos, ficou em aberto.

Essa insatisfação conceitual (teórica) levou os escolásticos



medievais a reelaboraram os argumentos pela unicidade do tempo. Essa discussão começa com a contribuição de Alexandre de Afrodísia (198–209), um dos mais importantes comentadores de Aristóteles. Em seu tratado intitulado *De Tempore*, Alexandre apontou a necessidade de **reformular a definição de tempo aristotélica**, a fim de evitar a multiplicidade do tempo. Influenciado pelas ideias de Aristóteles, que havia defendido que o movimento dos céus é a melhor maneira de contar o tempo, Alexandre sugeriu definir o tempo não como a medida de um movimento qualquer, mas como a medida do movimento dos corpos mais distantes da esfera celeste. **Ou seja, Alexandre propõe que o movimento (dos céus) possui preferência ontológica sobre a noção de tempo, não existindo tempo sem que exista o movimento dos céus para medi-lo.**

Em termos conceituais, o que Alexandre fez foi definir o tempo como uma convenção, excluindo qualquer possibilidade da multiplicidade do tempo. Em conjunto com a tese da simultaneidade visual, essa convenção concede à simultaneidade não-local um significado *espacialmente ilimitado*. A partir dessa concepção, é possível conceber a sincronização de dois eventos tão distantes quanto se queira, em qualquer lugar do universo, bastando utilizar a observação direta do movimento celeste. Historicamente, Alexandre determinou o primeiro padrão mundial de tempo, também conhecido como relógio padrão.

Avicena (980-1037), filósofo e médico nascido na Ásia Central, introduziu uma explicação dinâmica (causal) para o movimento. Sua motivação era a insatisfação com a abordagem puramente cinemática de Alexandre, que determinou o tempo através de uma convenção. Segundo sua teoria das emanações, o movimento do céu não é apenas o relógio padrão, mas também a causa dos movimentos dos corpos terrestres. O mecanismo causal que vincula ambos os movimentos são emanações, que se originam em Deus, e se propagam das esferas celestes para a Terra, em um processo eternamente duradouro.

Figura 9: Avicena, gravura, por Georg Paul Busch (1720). Museu Nacional Germânico, Nuremberg.



Fonte: sítio Digitaler Portrait Index.<sup>7</sup>

Averroes (1126-1198), filósofo, médico e astrônomo, viveu boa parte de sua vida na península ibérica, quando ocupada pelos mouros. É conhecido pelos escolásticos medievais como “O Comentarista”, pelos extensos comentários sobre as obras de Aristóteles. Concordando com Avicena e Alexandre, adicionalmente ele apontou a questão de como uma pessoa consegue perceber o fluxo do tempo em um dia nublado, sem que pudesse acompanhar o movimento dos céus. Ele argumenta que algo mais seria necessário para o reconhecimento do tempo em toda parte. E conclui que experimentamos diretamente a passagem do tempo através da nossa própria mutabilidade, do envelhecimento do nosso corpo.

---

<sup>7</sup> Disponível em:  
<<http://www.portraitindex.de/documents/obj/33702103/gmmp01178-0016>>.  
Acesso em maio 2015.

Figura 10: Averroes, detalhe da pintura O Triunfo de Santo Tomás de Aquino, de Andrea di Bonaiuto. Igreja de Santa Maria Novella, Florença.



Fonte: sítio The Basics of Philosophy.<sup>8</sup>

Ainda sobre a percepção do tempo, o frade inglês William de Ockham (1288-1348), conhecedor dos argumentos de Averroes, disse que mesmo um cego que nunca observara o céu poderia compreender a passagem do tempo.

Alguém cego de nascimento não conhece a proposição "o céu se move", pois ele nunca viu o movimento celeste; ele pode, no entanto, compreender o movimento do céu por um conceito composto. Basta que ele compreenda a proposição "eu coexisto com um certo corpo em movimento contínuo e uniforme" (OCKHAM, apud JAMMER, 2006, p. 57, tradução nossa).

A discussões realizadas pelos escolásticos medievais, motivadas pela insatisfação conceitual com os argumentos de Aristóteles, ainda que profundas e importantes, não foram suficientes para resolver a questão da multiplicidade do tempo. Entretanto, pouco a pouco, o tempo se

8 Disponível em:  
<[http://www.philosophybasics.com/philosophers\\_averroes.html](http://www.philosophybasics.com/philosophers_averroes.html)> Acesso em maio 2015.

desvincula do movimento.

Foi na Renascença, um período de intenso desenvolvimento artístico e intelectual, que os filósofos italianos Bernardino Telesio (1509-1588) e Francesco Patrizi (1529-1597) realizaram uma ruptura com o quadro conceitual estabelecido pelos escolásticos: inverteram a prioridade ontológica do movimento sobre o tempo. Para esses filósofos, o tempo não pode ser medido sem movimento, mas discordam dos escolásticos medievais de que não existe tempo sem o movimento dos céus. Com isso, desvincula-se a associação, que iniciou-se com Aristóteles, entre tempo e movimento, que já durava quase dois milênios.

Figura 11: Bernardino Telesio, gravura.



Fonte: sítio do Centro Internazionale di Studi Telesiani “Alain Segonds”.<sup>9</sup>

Com essa inversão, a pluralidade dos movimentos não implicava mais na multiplicidade do tempo. Mas a unicidade do tempo ainda não estava plenamente estabelecida. Surge neste debate o francês Pierre Gassendi (1592-1655), que decidiu abolir o tempo mecânico em

9 Disponível em: <<http://www.telesio.eu/images/biografia/telesio.jpg>> Acesso em maio 2015.

favor do tempo mental. Como fizeram Telesio e Patrizi, Gassendi também inverte a prioridade ontológica do movimento sobre o tempo.

Tempo não é algo que depende do movimento, ou posterior à ele; mas é indicado como algo que está sujeito a algumas medidas. Do contrário, seria impossível saber quanto tempo gastamos fazendo alguma coisa, ou não fazendo (GASSENDI, 1658 apud JAMMER, 2006, p. 60, tradução nossa).

Para Gassendi, o tempo não tem começo nem fim, e é o mesmo em todos os lugares. Se os céus deixassem de se mover, o tempo não deixaria de fluir. Os movimentos ocorrem *no tempo*. Esta é a primeira teoria de tempo absoluto que se conhece, mesmo que o adjetivo *absoluto* ainda não tenha sido usado por Gassendi, e que transcorre independentemente dos movimentos.

É importante notar que a insatisfação com o conceito aristotélico, que sugeria uma multiplicidade de tempos, foi o ponto de partida para que na Renascença a vinculação do tempo com o movimento fosse abandonada. A busca pela unicidade do tempo concedeu o direito próprio de sua existência, construída em discussões conceituais que duraram mais de um milênio. O vínculo do tempo com o movimento foi rompido, e a prioridade ontológica do movimento sobre o tempo foi invertida, ocasionando uma ruptura com o conhecimento anterior.

Figura 12: Pierre Gassendi, pintura, por Louis-Édouard Rioult. Museu Nacional Châteaux de Versailles, França.



Fonte: sítio do Ministério da Cultura e Comunicação da França.<sup>10</sup>

O filósofo norte americano Larry Laudan (1937-2002) chama a atenção que esse tipo de fenômeno, no desenvolvimento científico, tem sido negligenciado pelos filósofos. Laudan (2010) denomina essas insatisfações com o corpo de uma teoria de *Problemas Conceituais*. Neste caso específico, as insatisfações foram causadas pela percepção de uma contradição interna da teoria aristotélica (a multiplicidade do tempo), e é denominado *Problema Conceitual Interno*. Além da contradição, ambiguidades e circularidades também podem caracterizar esse tipo de problema. Desse modo, mesmo o desenvolvimento conceitual de uma teoria é mostra do caráter problemático do cotidiano da ciência, situação muitas vezes ignorada na educação científica. O desenvolvimento científico também não ocorre através da simples acumulação de conhecimento, apesar de haver alguma linearidade. A evolução da ciência também se dá através de rupturas.

#### 5.4 – SIMULTANEIDADE NAS MEDIÇÕES: UM CONCEITO SUBJACENTE

O conceito de simultaneidade está intimamente ligado a

<sup>10</sup> Disponível em:

<[http://www.culture.gouv.fr/Wave/image/joconde/0635/m507704\\_99de12470\\_p.jpg](http://www.culture.gouv.fr/Wave/image/joconde/0635/m507704_99de12470_p.jpg)> Acesso em maio 2015.

medidas de comprimento ou de distâncias. Para determinar a altura de um muro, por exemplo, pode-se aproximar, simultaneamente, as extremidades de uma fita métrica das extremidades do muro. Considerando que o zero da escala está na base do muro, observa-se o valor da fita junto ao topo do muro.

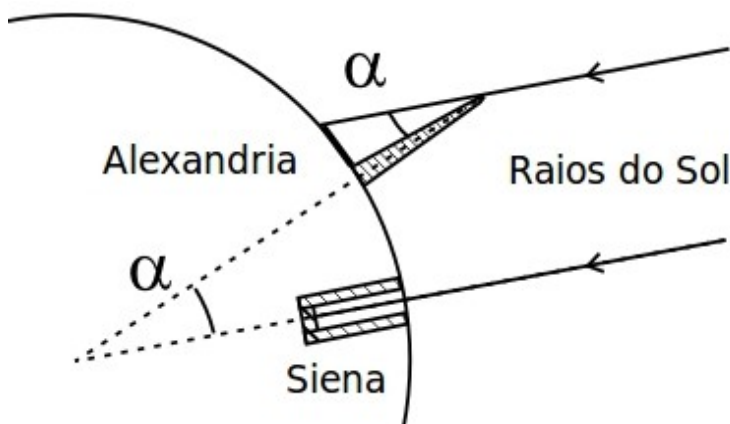
Essa é uma medição direta, entretanto, medições indiretas também podem necessitar do conceito de simultaneidade em seu procedimento operacional. Para discutir o papel do conceito de simultaneidade nas medições, especialmente no tocante a distâncias, pode-se voltar novamente à Grécia antiga.

A Antiguidade grega era uma sociedade onde o tempo era medido pelo movimento do Sol, ampulhetas e clepsidras; as mensagens eram transmitidas por escrito, oralmente por mensageiros, ou por sinais de fumaça. As medições de tempo eram utilizadas primariamente para marcar *quanto tempo* um processo demorava para ocorrer, não *quando* ele ocorria. Dificilmente o uso da noção de simultaneidade não-local era necessário cotidianamente, exceto nas medições diretas de comprimento, onde vale a simultaneidade visual aristotélica.

Uma exceção foi a medição indireta da circunferência da Terra, feita pelo astrônomo grego Eratóstenes de Siena (276-194 a.C.). Ele havia percebido que em sua cidade natal (Siena), ao meio-dia do solstício de verão (o dia mais longo do ano), o Sol ficava a pino. Após frequentar a escola de Platão, em Atenas, Eratóstenes foi designado diretor da biblioteca de Alexandria, uma cidade ao norte de Siena. Ele ocupou esse cargo até sua morte.

O método de Eratóstenes consistia em realizar simultaneamente duas observações: em Meroe (Alexandria) uma pessoa deveria medir o comprimento da sombra do obelisco local precisamente no momento em que o fundo de um poço profundo em Siena (Assuan) estivesse completamente iluminado pelos raios do sol. Os dois lugares supostamente se encontravam no mesmo meridiano (JAMMER, 2006, p. 19, tradução nossa).

Figura 13: O método de Eratóstenes.



Fonte: adaptada pelo autor.<sup>11</sup>

Eratóstenes, que também era matemático, sabia que o arco  $S$  descrito entre Siena e Alexandria (distância entre as cidades) é proporcional ao ângulo  $\alpha$  encontrado ( $7,2^\circ$ ). Realizando um cálculo de proporção direta, obtém-se:

$$\frac{S}{C} = \frac{\alpha}{360^\circ} = \frac{7,2^\circ}{360^\circ} = \frac{1}{50} \Rightarrow \frac{S}{C} = \frac{1}{50} \Rightarrow C = 50 S \quad (3)$$

Conhecendo a distância entre as duas cidades, de aproximadamente 5 mil estádios, Eratóstenes determinou que a circunferência da Terra era de 250.000 estádios. Não existe certeza quanto à equivalência entre a unidade de estádio e o metro. Entretanto, usando uma estimativa de que cada estádio corresponde a 157 metros, obtém-se para a circunferência da Terra um valor de 39.250 km. Determinações modernas da circunferência da Terra, nos meridianos, indicam 40.000 km, resultando em um erro menor que 2%. Na execução do método, não existe registro de que tenha havido duas observações simultâneas. Entretanto, isso não era necessário, pois sendo Eratóstenes

11 Adaptado de: <<http://www.eratosthenes.eu/spip/local/cache-vignettes/L640xH491/module-guide-figure-3-42c41.jpg>> Acesso em maio 2015.

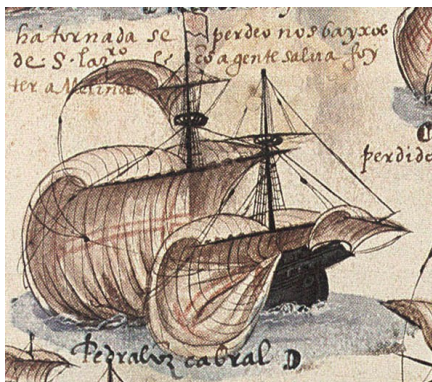


de Siena ele sabia que no solstício de verão o Sol estaria a pino nesta cidade. Bastava saber em qual dia do ano o solstício ocorreria, e realizar a medida do ângulo dos raios solares ao meio dia solar na sombra do obelisco, em Alexandria.

Esse método se apoia no fato (geométrico e astronômico) de que a hora solar de duas cidades, no mesmo meridiano terrestre, é *a mesma*. Portanto, dois relógios de sol, um em Siena e outro em Alexandria, estão *sempre sincronizados*. A noção de simultaneidade implícita neste método é que dois eventos são simultâneos quando ocorrem no mesmo instante  $t$  de dois relógios (de sol) sincronizados (no mesmo meridiano).

Outro exemplo de sincronização de eventos para realizar medidas de distâncias muito grandes ocorreu na Renascença, durante as grandes navegações. Nos séculos XV e XVI, os europeus lançaram-se ao mar a fim de descobrir novas rotas comerciais com a Índia e territórios para o extrativismo. Os altos preços das especiarias, promovido pelo monopólio comercial no mar Mediterrâneo entre venezianos e genoveses, fez com que portugueses e espanhóis buscassem novas rotas marítimas através da costa africana e atlântico norte.

Figura 14: Nau de Pedro Álvares Cabral, ilustração.



Fonte: Livro das Armadas, Academia das Ciências de Lisboa.<sup>12</sup>

12 Disponível em:

<[http://purl.pt/162/1/brasil/iconografia/armada/28\\_barco\\_cabral/index.html](http://purl.pt/162/1/brasil/iconografia/armada/28_barco_cabral/index.html)>

Acesso em maio 2015.

Para que os navegadores pudessem se localizar no meio do oceano, necessitavam de métodos para determinar a latitude e longitude. Isso era indispensável a uma navegação segura e a elaboração de mapas precisos. A latitude pode ser determinada mais facilmente com métodos de observação da altura de algumas estrelas, por exemplo, da Estrela Polar do Norte, que fica na constelação de Ursa Menor. Esta estrela localiza-se aproximadamente no polo celeste norte, de modo que todo céu (abóboda celeste) parece girar em torno dela. A observação direta da sua altura angular (declinação) determina a latitude de um observador no hemisfério norte. Para um observador no hemisfério sul, é necessário o uso de outros métodos, pois a estrela polar não é visível.

Já a determinação da longitude é um processo muito mais complicado. Dentre os vários métodos sugeridos na época, um deles faz uso do conceito de simultaneidade não local, sendo proposto por Reinerus Gemma (1508-1555). Também conhecido por Frisius, por ter nascido na província de Frísia, ao norte da Holanda, Gemma foi um médico e astrônomo que se dedicou à construção e aperfeiçoamento de instrumentos astronômicos.

Figura 15: Reinerus Gemma, gravura, por Esme de Boulonois.

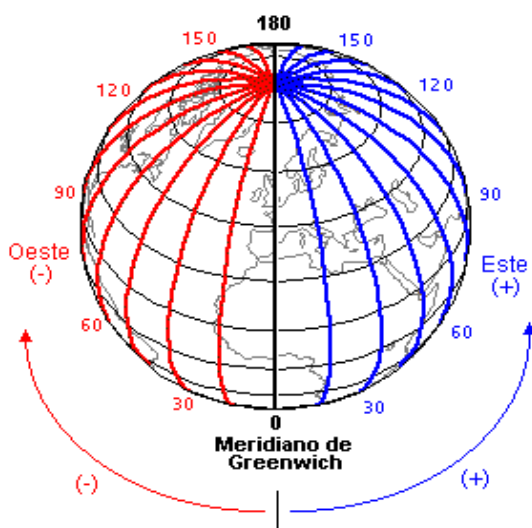


Fonte: sítio da Biblioteca do Congresso Americano, Washington, D.C.<sup>13</sup>

13 Disponível em: <<http://loc.gov/pictures/resource/cph.3c11786/>> Acesso em maio 2015.

Em 1530, ele sugeriu o seguinte método: (1) sincronizar um relógio portátil com um relógio mestre em um porto conhecido; (2) levar o relógio portátil a bordo de um navio que se dirige para alto mar; (3) comparar o meio dia solar, determinado por um relógio de sol a bordo do navio, com o horário mostrado no relógio portátil. Uma volta completa equivale a  $360^\circ$ , que divididos por 24 horas implica que cada hora representa uma rotação de  $15^\circ$  da Terra. Assim, basta multiplicar o fuso horário encontrado por 15 para se obter a longitude aproximada do navio, em relação ao porto de saída. Atualmente, o meridiano de referência é o de Greenwich, que fica no observatório de Londres.

Figura 16: Meridianos.



Fonte: sítio Mundo Educação.<sup>14</sup>

Para que o método funcione, são necessárias duas condições: (1) a determinação exata da hora local; (2) o transporte de um relógio de precisão a bordo do navio (também chamado de cronômetro marítimo).

14 Disponível em:

<<http://www.mundoeducacao.com/upload/conteudo/orientacao1.jpg>> Acesso em maio 2015.

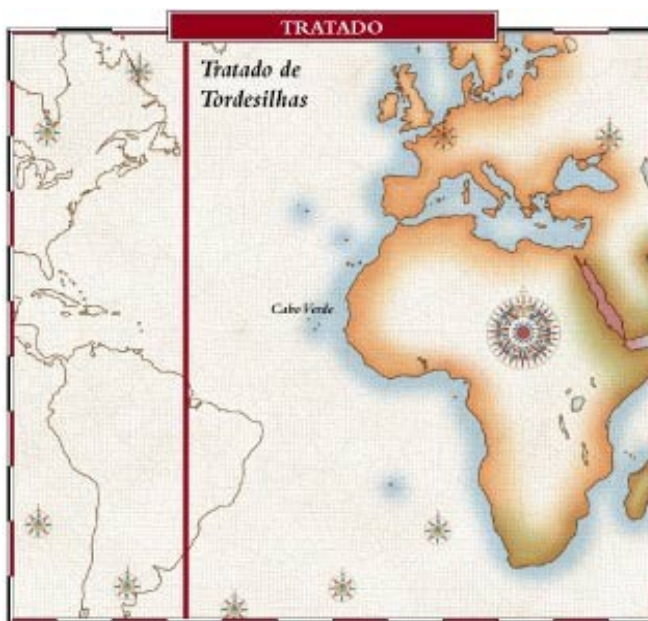
Não há grandes problemas em determinar a hora local, especialmente se as medidas ocorrerem ao meio-dia solar. O problema eram os relógios de precisão.

O seguinte exemplo ilustra a importância e a necessidade da precisão. Admitindo-se que um navegador viaja 6 semanas próximo ao equador, e que ele deseja saber sua posição com um erro de, no máximo,  $0,5^\circ$  (56 km), qual deve ser a precisão do relógio por ele utilizado? Para calcular qual é o fuso horário de  $0,5^\circ$ , faz-se a seguinte proporção: se 24 horas equivalem a  $360^\circ$ , então:

$$\frac{24}{x} = \frac{360}{0,5} \Rightarrow x = \frac{1}{30} \text{ horas} = 120 \text{ segundos} (2 \text{ min.}) \quad (4)$$

Em uma viagem de 6 semanas (42 dias), que era o tempo usual para cruzar o Oceano Atlântico na época, o cronômetro marítimo não poderia atrasar mais do que 3 segundos por dia. Entretanto, relógios com esta precisão inexistiam na época. Além da navegação, demarcações de terras também necessitavam de medida de longitude, como no tratado de Tordesilhas (1494), que estabelecia uma divisão de terras entre Portugal e Espanha. Nesse tratado, as terras localizadas além de 370 léguas (1770 km) do arquipélago de Cabo Verde seriam dos espanhóis; as localizadas antes seriam de propriedade dos portugueses. O meridiano de Tordesilhas passa na cidade de Laguna/SC.

Figura 17: Tratado de Tordesilhas.



Fonte: sítio da revista Veja.<sup>15</sup>

Diversos tipos de relógios haviam sido inventados até o século XIV, tais como a clepsidra, a ampulheta, o relógio de sol e o relógio de vela. Por volta do século XI, surgiram relógios mecânicos em mosteiros medievais, que usavam engrenagens e um conjunto de pesos como mecanismo de ação. Esses relógios não eram precisos, sendo usados para regular as atividades cotidianas do serviço religioso (mas não para a navegação). Costumavam ficar em torres e executavam badaladas periodicamente.

15 Disponível em:

<<http://veja.abril.com.br/idade/descobrimento/imagens/descobrimento3.jpg>>

Acesso em maio 2015.

Figura 18: Relógio de Sol, de água, ampulheta e de vela.



Fonte: adaptada pelo autor, fonte desconhecida.

A necessidade do comércio internacional e da exploração do *Novo Mundo* funcionou como um impulso sem precedentes para a evolução dos relógios. Os primeiros relógios mecânicos portáteis (de bolso) surgiram no início século XVI, movimentados por algum elemento mecânico que funcionava como uma mola, como uma fita de aço ou tripa de porco. Entretanto, ainda que muito melhores que os anteriores, eram relógios com uma variação da ordem de 15 minutos por dia, inapropriados para a precisão requerida pelo método de Gemma, de 1530.

Figura 19: Relógio portátil, período da Renascença.



Fonte: sítio do Metropolitan Museum of Art, Nova York.<sup>16</sup>

A descoberta do fenômeno do isocronismo do pêndulo pelo físico, astrônomo e matemático italiano Galileu (1564-1642), no final do século XVI, abriu novas portas tecnológicas para a fabricação de relógios mecânicos com mais precisão, pois até então os relógios funcionavam sem o uso de um mecanismo oscilatório periódico. Mas Galileu morreu sem construir um relógio de pêndulo. Foi necessário esperar até 1656 para que o primeiro protótipo fosse construído pelo físico, matemático e astrônomo holandês Cristhiaan Huygens (1629-1695). Esse tipo de relógio se difundiu amplamente pela Europa nos anos seguintes.

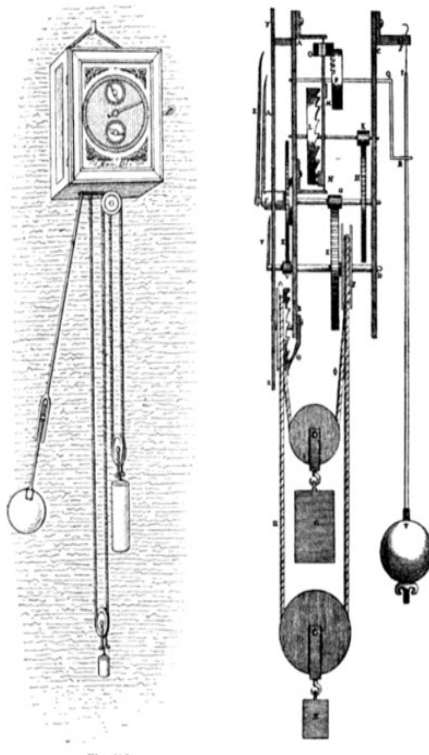
Os melhores relógios de pêndulo possuíam um erro em torno de 10 segundos ao dia. Além de imprecisos para o método de Gemma, não eram adequados para o uso em embarcações, principalmente por causa do balanço do mar.

Mesmo que o desenvolvimento de relógios mais precisos ainda não fosse suficiente para resolver o problema da determinação da longitude, sua disponibilidade aos astrônomos resultou na determinação da velocidade da luz. Em 1665 o astrônomo italiano Giovanni Domenico Cassini (1625-1712) elaborou uma tabela com os movimentos dos satélites de Júpiter descobertos por Galileu em 1610, com o uso do telescópio. Essa tabela tornava possível prever os eclipses dos satélites desse planeta.

---

16 Disponível em: <[http://www.metmuseum.org/toah/images/h2/h2\\_29.52.7.jpg](http://www.metmuseum.org/toah/images/h2/h2_29.52.7.jpg)>  
Acesso em maio 2015.

Figura 20: Relógio de Huygens (1657).



Fonte: Wikipédia.<sup>17</sup>

Alguns anos mais tarde, em 1676, o astrônomo dinamarquês Olaf Roemer (1644-1710), que trabalhava para Cassini, percebeu que os eclipses do satélite Io começavam cerca de 7 (sete) minutos antes do previsto, quando a Terra está entre o Sol e Júpiter (posições B ou E). Já quando o Sol se encontrava entre a Terra e Júpiter (posições C ou D), os eclipses se atrasavam cerca de 7 minutos. A explicação que Roemer deu a este fato foi de que o atraso era causado pelo tempo adicional que a luz demora para percorrer a variação de distância (BC ou DE) da Terra em

17 Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Pendulum\\_clock](http://en.wikipedia.org/wiki/Pendulum_clock)> Acesso em maio 2015.



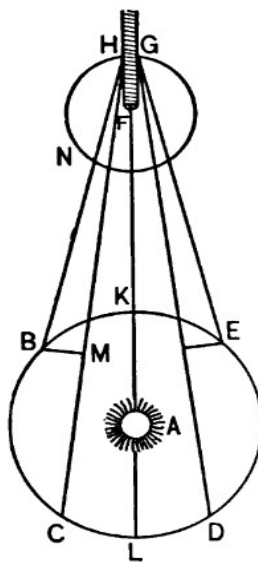
relação a Júpiter, decorrente da órbita da Terra em torno do sol.

Apesar de ter elaborado um método, que não será descrito aqui, para calcular a velocidade da luz, existe controvérsia se Roemer, realmente, chegou a um valor para essa velocidade<sup>18</sup>. O importante é que Roemer confiou mais em suas medidas, obtidas com os relógios nem tão precisos da época, do que na tese da simultaneidade visual de Aristóteles, ainda assumida pela comunidade científica da época. Essa confiança não foi fruto exclusivo de algum *insight* genial ou autoconfiança excessiva, mas provavelmente sugerida por especulações anteriores sobre a finitude da propagação da luz, de Empédocles, Francis Bacon, Avicena e Galileu. Neste caso, constata-se que os dados experimentais não são analisados de forma neutra pelo cientista. A tese da simultaneidade visual era consenso entre os cientistas, portanto, abandoná-la, em favor de dados observacionais questionáveis, é um ato que só pode ser suportado por convicções teóricas prévias e bem fundamentadas. As conclusões de Roemer sobre a velocidade finita da luz eram frágeis, ainda que fossem corretas, e a comunidade científica da época não se convenceu por completo.

---

18 WRÓBLEWKI, 1985.

Figura 21: Determinação da velocidade da luz.



Fonte: Tratado da Luz, Huygens (1690).<sup>19</sup>

Em 1728, o astrônomo inglês James Bradley (1693-1762) descobriu o fenômeno da aberração estelar. Ele observou que uma estrela não fica parada em relação ao observador terrestre, mas sim que descreve uma pequena elipse fechada durante um ano. A explicação dada por Bradley é a de que esse fenômeno é causado pela velocidade finita da luz e pelo movimento da Terra ao redor do Sol. Além disso, Bradley calculou a velocidade da luz, chegando a um valor muito próximo do aceito atualmente.

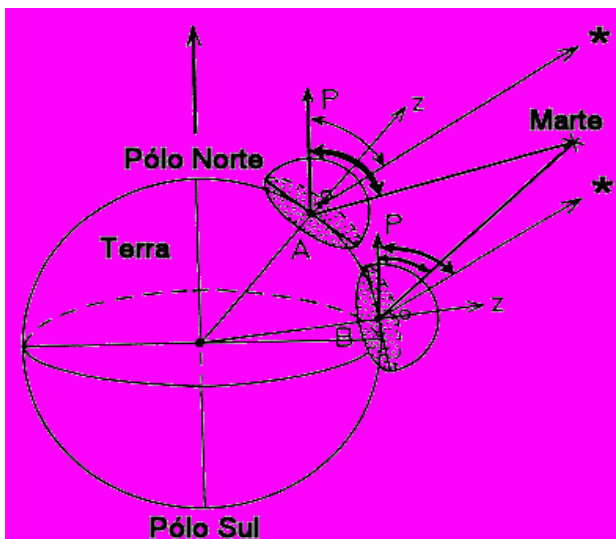
Após o fenômeno da aberração estelar e das observações de Roemer, a tese da simultaneidade visual foi deixada de lado pelos cientistas. Isso representou uma mudança drástica na imagem física da natureza, pois mostrava que

<sup>19</sup> Disponível em: <[https://www.stmarys-ca.edu/sites/default/files/attachments/files/Treatise\\_on\\_Light.pdf](https://www.stmarys-ca.edu/sites/default/files/attachments/files/Treatise_on_Light.pdf)> Acesso em maio 2015.

a realidade difere consideravelmente da sua aparência. A imagem simultânea do mundo, como pode ser visto pelos nossos olhos, é uma ilusão. Mas, é claro, se as distâncias e as velocidades são pequenas, como são em nossa vida cotidiana, essa diferença entre a ilusão e a realidade torna-se insignificante (JAMMER, 2006, p. 64, tradução nossa)..

Outra medida astronômica importante foi a determinação da distância Terra-Marte, feita por Cassini em 1671, utilizando o método de paralaxe. Esse método consiste em medir a separação angular de um objeto, obtida através de duas medidas simultâneas, realizadas por dois observadores em pontos distintos. De posse da separação angular, calcula-se a distância ao objeto.

Figura 22: Método da paralaxe.



Fonte: sítio Astronomia e Astrofísica.<sup>20</sup>

20 Disponível em <<http://astro.if.ufrgs.br/telesc/astrometria.htm>>. Acesso em maio 2015.

As observações foram realizadas no observatório de Paris, sob o comando de Cassini, e na cidade de Caiena (Guiana Francesa), sob a responsabilidade de seu colega Jean Richer (1630-1696). Como relógios precisos o suficiente para sincronizar eventos tão distantes, transportados por navios, ainda não haviam sido desenvolvidos, eles tiveram que utilizar as tabelas de Cassini dos eclipses lunares de Júpiter. De posse da distância Terra-Marte, e utilizando a terceira lei de Kepler, foi possível determinar as distâncias entre os planetas do sistema solar.

A engenhosa sincronização de medidas, utilizando as luas de Júpiter como um relógio, denota, mais uma vez, a noção de que dois eventos são simultâneos se ocorrem no mesmo tempo  $t$  de um relógio. A diferença para o método de Eratóstenes é que o relógio era o Sol, e dependia das cidades estarem no mesmo meridiano. No caso de Cassini, o relógio era o céu, tal qual sugeriu Alexandre de Afrodísia. Roemer trabalhou com Cassini, que foi chefe do observatório de Paris na época desses dois episódios, e observou as disparidades nos eclipses enquanto compilava tabelas deste fenômeno para Cassini. O intrincado contexto dessas descobertas revela que dificilmente se pode falar que a ciência é praticada por indivíduos isolados uns dos outros.

A medida da circunferência da Terra, a medição da longitude em alto mar, a medição da velocidade da luz e a determinação das distâncias interplanetárias indicam que o desenvolvimento do conceito de simultaneidade está intimamente ligado ao contexto de problemas empíricos importantes na história da Física, não podendo ser separado deles. A resolução destes problemas contribuiu significativamente para o incremento do conhecimento científico. Sem dúvida, todos esses problemas contém, implicitamente em seus métodos de resolução, alguma concepção de simultaneidade, sob o qual se fundamentam.

O aperfeiçoamento dos relógios continuou, mas a demora em estabelecer um método preciso de determinação da longitude levou o parlamento inglês a aprovar o *Longitude Act* (1714)<sup>21</sup>, que instituía um prêmio de 20 mil libras para quem concebesse um método capaz de determinar a longitude com um erro menor que 0,5°. As dificuldades de inventar um cronômetro marítimo mecânico eram aumentadas por causa do balanço do mar e das variações de temperatura e pressão, que demandavam mecanismos de compensação muito complexos. Esse tipo de prêmio não era inédito; em 1598 o rei Felipe III, da Espanha,

---

21 Maiores informações em <<http://cudl.lib.cam.ac.uk/view/ES-LON-00023>>. Acesso em maio de 2015.

ofereceu uma pensão vitalícia pra quem resolvesse o problema da medição da longitude.

O relojoeiro inglês John Harrison (1693-1776) trabalhou, desde 1730, com o intuito de construir um cronômetro marítimo com a precisão desejada, e assim ganhar o prêmio. Em sua quarta tentativa, já tendo quase desistido na terceira, Harrison achou que tinha conseguido, e reclamou seu prêmio em 1761. Mas medidas posteriores em 1765 revelaram que seu cronômetro, denominado de H4, ainda não estava dentro dos parâmetros desejados, e ele recebeu apenas metade do prêmio (10 mil libras).

Figura 23: H1 (à esquerda) e H5 (à direita).



Fonte: sítio Relógios Mecânicos (adaptado pelo autor).<sup>22</sup>

Harrison não desistiu, e em sua quinta tentativa, após mais de 40 anos de trabalho, conseguiu, em 1772, construir um cronômetro (H5) que atrasava apenas 1/3 de segundo por dia. Em 1773 o parlamento, por influência direta do rei George III, pagou a ele mais 8,75 mil libras. Harrison já estava com 80 anos, e faleceu logo depois, em 1777. Portanto, não é exagero dizer que este foi o trabalho de toda uma vida de um notável relojoeiro.

O interesse econômico no comércio internacional de países como Inglaterra, Portugal e Espanha, associado ao método de Gemma,

<sup>22</sup> Disponível em <<http://www.relogiosmecanicos.com.br/>>. Acesso em maio 2015.

resultou no avanço sem precedentes da tecnologia relojoeira. Essa tecnologia, por sua vez, contribuiu decisivamente para as descobertas de Cassini e Roemer, além de tornar a navegação muito mais segura. As Grandes Navegações, e os seus desdobramentos, ilustram como a ciência, e sua produção tecnológica, não são desvinculadas de outras atividades sociais da humanidade, como a econômica. O método de Gemma continuou sendo usado até o século XX, com a diferença de que a hora do meridiano de referência era obtida por meio de comunicação via rádio, não através do transporte de um relógio. No final do século passado, surge o Sistema de Posicionamento Global (GPS), que substitui o método de Gemma, utilizado havia dois séculos.

## 5.5 – FÍSICA CLÁSSICA: NEWTON E O TEMPO ABSOLUTO.

É bastante provável que a concepção temporal de Gassendi tenha influenciado a noção de tempo de dois grandes personagens que marcam o fim da Renascença: os ingleses Isaac Barrow (1630-1677) e Isaac Newton (1643-1727). Barrow foi professor de Newton em Cambridge, e também separou o tempo do movimento, concedendo ao tempo prioridade ontológica.

Quando a absoluta e intrínseca natureza [do tempo] está em causa, não importa se as coisas correm ou ficam paradas, se estamos dormindo ou acordados; o tempo flui segundo seu próprio curso. Mesmo se todas as estrelas tivessem permanecido no lugar em que foram criadas, nada teria sido perdido no tempo (BARROW, apud JAMMER, 2006, p. 69).

Possivelmente, essa é a primeira vez que o termo *absoluto* foi utilizado para caracterizar o conceito de tempo<sup>23</sup>. **Ainda que o tempo seja independente do movimento, Barrow admite que é necessário usar movimentos para medi-lo;** por exemplo, o movimento dos astros. Mas ele sabiamente se pergunta: como ter certeza de que o movimento dos astros se repete com a mesma duração? Em outras palavras, ele se pergunta se é possível determinar durações de tempos iguais, quando estas durações ocorrem uma após a outra. Sua resposta é positiva, pois se pode comparar o tempo dos astros com diferentes tipos de relógios

23 JAMMER, 2006, p.70.

artificiais, e vice versa.

Barrow nunca discutiu a noção de simultaneidade não local, tão utilizada nas medições de distâncias apresentadas anteriormente. Mas é possível deduzir que, para Barrow, a simultaneidade entre dois eventos significa que eles ocorrem no mesmo instante  $t$  do tempo absoluto (que pode ser determinado pelo uso de bons relógios sincronizados), e que eventos que começam e terminam juntos necessariamente duram tempos iguais. Ele também utilizou uma linha reta para representar geometricamente o tempo.

Figura 24: Isaac Barrow, pintura, por David Loggan (1676).



Fonte: sítio da Galeria Nacional de Retratos, Londres.<sup>24</sup>

Em sua obra magistral intitulada *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Princípios Matemáticos de Filosofia Natural), publicada em 1687, Isaac Newton formulou uma das mais importantes teorias da Física: a sua mecânica. Nesta obra constam suas três leis do movimento e a lei da gravitação. Segundo o próprio Newton, para que

24 Disponível em <[http://images.npg.org.uk/800\\_800/7/8/mw09078.jpg](http://images.npg.org.uk/800_800/7/8/mw09078.jpg)>. Acesso em maio 2015.

essas leis não sejam expostas de maneira árida, ele enuncia alguns escólios filosóficos sobre o qual elas estão fundamentadas. É justamente em um desses escólios que se encontra a definição de tempo absoluto de Newton.

O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo, e a partir da sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa, e é também chamado de duração; o tempo relativo, aparente e comum, é uma medida do tempo perceptível e externo (seja a medida exata ou desigual) que é obtida através dos movimentos e que é normalmente usada no lugar do tempo verdadeiro; tal como uma hora, um dia, um mês, um ano (NEWTON, 1934, p. 6, tradução nossa.).

Newton distingue o tempo ordinário e vulgar (relativo), do qual percebemos sua passagem diretamente através dos sentidos, ou por meio de relógios, do tempo em si, que só pode ser compreendido através da abstração e da reflexão filosófica. O tempo absoluto independe dos processos físicos. Juntamente com o conceito de espaço absoluto, ambos formam um palco onde se desenrolam os fenômenos naturais. É nesse tempo metafísico que sua teoria está fundamentada. O tempo absoluto, com direito próprio de existência, tem prioridade sobre a noção de movimento (absoluto). O movimento ocorre *no tempo absoluto*. Pode-se perceber muitas semelhanças com o tempo de Gassendi e Barrow. Como tal tempo é inacessível aos sentidos, Newton admite que só podemos nos referir de maneira prática ao tempo relativo, medido pelo movimento dos céus ou dos relógios mecânicos (que estavam se popularizando na Europa).

Mas qual o motivo de Newton manter o tempo absoluto, se para fins práticos ele não tem importância? O tempo absoluto de Newton advém, mas não só, da sua convicção da existência de um referencial privilegiado – o espaço absoluto – e da sua crença teológica, que ele expressa claramente quando diz que Deus

é eterno e infinito, onipotente e onisciente; isto é, seu tempo alcança da eternidade à eternidade, sua presença do infinito ao infinito [...] Ele dura pra



sempre, e está presente em todo lugar, e, por existir sempre e em todo lugar, ele constitui o tempo e o espaço (NEWTON, 1934, p. 545, tradução nossa.).

Discussões aprofundadas sobre o espaço e o tempo absolutos, apesar de necessárias para a compreensão global da Mecânica Newtoniana, fogem do objetivo deste texto. O importante é notar que, qualquer afirmação de Newton sobre o tempo em sua teoria, é ao tempo absoluto que ele se refere.

Dada a limitação da percepção sensorial humana do tempo absoluto, Newton também se perguntou, assim como Barrow, se os relógios podem fornecer uma medida precisa da passagem do tempo. Em outras palavras, se o tempo relativo flui paralelo ao tempo absoluto, de maneira equivalente. Diferente de Barrow, Newton deixa essa questão em aberto. **Isso significa que a teoria newtoniana aceita divergências na medida de tempo entre relógios, sem que isso contraponha a noção de tempo absoluto.**

Com relação ao conceito de simultaneidade, Newton não teceu considerações específicas sobre essa questão. Entretanto, deriva-se logicamente que a simultaneidade newtoniana é absoluta. Eventos simultâneos para um observador são necessariamente simultâneos para quaisquer outros observadores; eventos que começam e terminam em tempos iguais, duram necessariamente tempos iguais. Entretanto, como o tempo absoluto é inatingível, **a simultaneidade absoluta newtoniana não pode ser determinada operacionalmente.**

Figura 25: Isaac Newton, pintura, por Godfrey Kneller (1702).



Fonte: sítio da Galeria Nacional de Retratos, Londres.<sup>25</sup>

As concepções newtonianas de tempo e simultaneidade não reinaram absolutas até o advento da relatividade, pelo contrário. Por causa da fundamentação metafísica (e teológica) de sua teoria, Newton recebeu críticas constantes e contundentes ao longo dos séculos seguintes. Isso significa que

a concepção de Newton da simultaneidade, como dito acima, difere da noção de simultaneidade da física clássica pós-Newton, em que considerações

---

25 Disponível em <[http://images.npg.org.uk/800\\_800/6/0/mw04660.jpg](http://images.npg.org.uk/800_800/6/0/mw04660.jpg)>. Acesso em maio 2015.

teológicas já não eram consideradas como argumentos constitutivos em seus sistemas teóricos (JAMMER, 2006, p. 74, tradução nossa.).

A simultaneidade, se não pode ser conhecida de maneira absoluta, na prática (no tempo vulgar) foi largamente determinada pelo uso de relógios sincronizados, tal como no método empregado por Gemma.

## 5.6 – FÍSICA CLÁSSICA: CRÍTICAS À NEWTON E O PRINCÍPIO DA ANTECEDÊNCIA DA CAUSA.

Um dos primeiros críticos de Newton, e talvez o mais importante, foi o filósofo, físico e matemático alemão Gottfried Leibniz (1646-1716). Leibniz tinha formação universitária em Direito e Filosofia, obtida na Universidade de Leipzig, e se tornou o primeiro membro estrangeiro da Royal Society, um pouco antes da publicação do *Principia* por Newton, em 1687. Conheceu o trabalho de Newton e foi aluno de Huygens; portanto, estava bem inserido no ambiente científico e filosófico de sua época.

Assim como na Renascença, quando o tempo ganhou direito próprio de existência, Leibniz realizou uma segunda inversão de prioridade muito importante: entre o tempo e simultaneidade. Leibniz criou uma teoria de tempo onde o conceito de simultaneidade é mais primitivo que o conceito de tempo, contrariando o que ocorria até o momento.

Se uma pluralidade de estados de coisas que se presume existir não envolve oposição umas as outras, diz-se que existem simultaneamente. Assim, negamos que o que ocorreu no ano passado e este ano sejam simultâneos, pois envolve estados incompatíveis da mesma coisa.

Se um dos dois estados que não são simultâneos envolver uma razão para o outro, o primeiro é considerado prévio, o subsequente posterior. Meu estado anterior envolve uma razão para a existência do meu estado posterior. E desde que o meu estado prévio, por motivo da conexão entre todas as coisas, envolve o estado prévio de outras

coisas também, envolve também uma razão para o estado posterior dessas outras coisas e é assim anterior a elas. Portanto, tudo o que existe é simultâneo com outras existências, ou prévia ou posterior.

Tempo é a ordem da existência das coisas que não são simultâneas. Assim, o tempo é a ordem universal das mudanças, quando não levamos em consideração os tipos particulares de mudança.

Duração é a magnitude de tempo. Se a magnitude do tempo é diminuída de modo uniforme e continuamente, o tempo desaparece no momento, cuja magnitude é zero.

Espaço é a ordem das coisas coexistentes, ou a ordem da existência das coisas que são simultâneas (LEIBNIZ, 1855 apud JAMMER, 2006, p. 80, tradução nossa.).

Por exemplo, dois estados climáticos, como *chuva* e *sol*, não podem coexistir em um mesmo local geográfico porque são oposição um ao outro. Assim sendo, não podem ocorrer simultaneamente. Mas se o sol envolver uma razão para o estado da chuva, como a elevação da temperatura e a formação de nuvens carregadas, então se pode dizer que um estado é prévio ao outro.

Figura 26: Gottfried Leibniz, pintura, por Bernhard Christoph Francke (1695).



Fonte: sítio do Museu Herzog-Anton-Ulrich, Braunschweig, Alemanha.<sup>26</sup>

De forma sucinta, primeiro Leibniz define a simultaneidade como a coexistência de estados que não são a causa um do outro. Em seguida, argumenta que a sucessão de estados (a negação da simultaneidade) ocorre quando um estado anterior envolve a causa do estado seguinte. A distinção entre o que é simultâneo e o que é sucessivo envolve a noção de causa, e isso é conhecido como o *Princípio da Antecedência da Causa*. Esse princípio também pode ser enunciado da seguinte forma: **a causa antecede o efeito**.

Como a teoria de Leibniz envolve uma razão (relação) entre estados sucessivos, é dita ser uma teoria relacional do tempo. Mantidas as devidas proporções, ela possui uma notável semelhança com a teoria aristotélica do tempo: relaciona a passagem do tempo com a mudança dos estados das coisas.

As críticas (e a teoria) de Leibniz foram feitas na mesma época em que a Mecânica Newtoniana se estabelecia na Inglaterra, e sugerem

---

26 Disponível em <[http://www.3landesmuseen.de/uploads/pics/GG\\_558\\_506x343px.jpg](http://www.3landesmuseen.de/uploads/pics/GG_558_506x343px.jpg)>. Acesso em maio 2015.

que, desde cedo, Newton nunca foi unanimidade com relação aos conceitos de tempo e simultaneidade.

Apesar do princípio da antecedência da causa ter sido primeiramente utilizado por Leibniz, foi somente com o filósofo prussiano Immanuel Kant (1724-1804) que ele se popularizou. Inicialmente, Kant concordou com a teoria de Leibniz; depois, com a teoria de Newton. Mais tarde, ele elaborou a sua própria teoria sobre o tempo. As críticas de Kant à teoria do tempo de Leibniz envolvem, como é de se esperar, o conceito primitivo de simultaneidade.

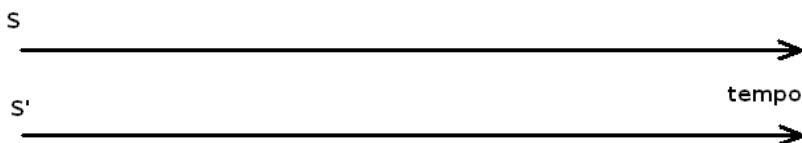
O primeiro ataque de Kant à Leibniz baseia-se no argumento de que a definição de tempo como *a ordem da existência das coisas* é circular, porque a sucessão já pressupõe a noção de tempo. Kant rejeita a simultaneidade como a antítese da sucessão e retoma novamente a prioridade do tempo sobre o conceito de simultaneidade.

Coisas que são simultâneas não são assim porque elas não são sucessivas umas às outras. Pois, embora a remoção de sucessão disjunta a ligação que existia em virtude da sequência temporal, não dá, assim, imediata origem a uma outra relação verdadeira, como a que se dá pela conjunção de tudo o que existe no mesmo instante de tempo. Existires simultâneos são ligados pelo mesmo momento do tempo, assim como sucessivos existires o são por diversos momentos de tempo (KANT, 1770 apud JAMMER, 2006, p. 84, tradução nossa.).

Kant é também adepto da representação geométrica do tempo como uma linha reta infinita, onde uma reta perpendicular marca as ocorrências simultâneas. Essa representação é usada por ele para levar adiante outra crítica à teoria de Leibniz: a de que a simultaneidade, para Leibniz, é uma convenção.

Assim, considere-se dois relógios, um na Terra, denominado S, e outro em Marte, chamado S'. Os relógios não guardam relação um com o outro (não foram sincronizados por qualquer método). A evolução da marcação do tempo reflete-se através dos sucessivos estados dos relógios. Os tempos são representados por duas retas paralelas.

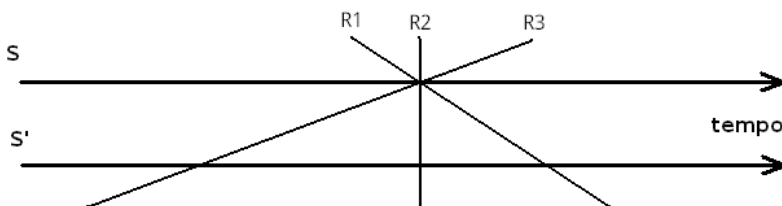
Figura 27: Linha do tempo.



Fonte: elaborada pelo autor.

Em princípio, nenhum estado de  $S$  pode ser dito simultâneo a algum estado de  $S'$ , até que seja traçada uma reta transversal que ligue um ponto de  $S$  à  $S'$ . Entretanto, várias retas transversais ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3...$ ) podem ser arbitrariamente traçadas, ligando um ponto em  $S$  até pontos distintos em  $S'$ , tornando a simultaneidade uma convenção.

Figura 28: A simultaneidade como convenção.

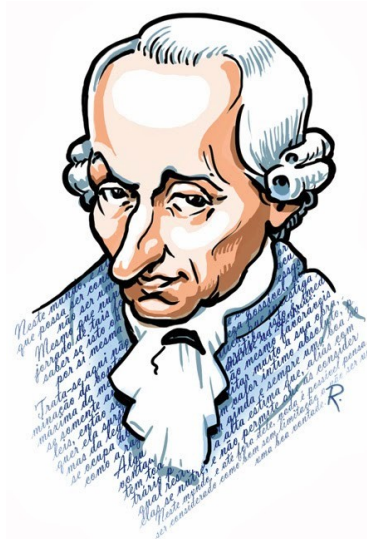


Fonte: elaborada pelo autor.

Kant rejeita enfaticamente essa possibilidade, pois para ele a simultaneidade não pode ser determinada por uma convenção, mas sim por um vínculo de diversos acontecimentos (ditos simultâneos) com um momento único no tempo.

O ápice da teoria kantiana aparece em sua obra monumental *A Crítica da Razão Pura* (1781). Nela, Kant defende que tempo e espaço não são noções derivadas da experiência, mas por ela pressupostas: **são pura intuição**. Uma argumentação kantiana poderia envolver, por exemplo, a pergunta: é possível imaginar um objeto que não esteja *no espaço*? Ou um acontecimento que não se dê *no tempo*? O mundo sensível é necessariamente analisado a partir das representações *a priori* do espaço e do tempo. A existência apriorística da noção de tempo é um ingrediente necessário para a consciência.

Figura 29: Immanuel Kant, caricatura, por Fernando Romeiro.



Fonte: sítio do ilustrador Fernando Romeiro.<sup>27</sup>

Outro ponto importante é que Kant distingue a ordem temporal objetiva dos acontecimentos, da ordem temporal da percepção sensorial humana. Um exemplo dessa distinção é justamente a argumentação de Sexto Empírico para a refutação da Astrologia, já comentada anteriormente. O caldeu no alto da montanha percebe o nascimento da criança atrasado, por causa do tempo de propagação finito do sinal sonoro, em contraste com a simultaneidade visual (aristotélica) da constelação que está nascendo no leste.

Kant define eventos sucessivos e simultâneos da seguinte maneira:

**Eventos sucessivos:** um evento  $e_1$  é dito anterior a outro evento  $e_2$  se, e somente se, **conforme alguma lei da natureza**,  $e_1$  é a causa

27 Disponível em <[http://1.bp.blogspot.com/\\_ZsPZv4Ne4E/UksH0kCwMsI/AAAAAAAAAY0/qN2k57VsOdk/s1600/01kant.jpg](http://1.bp.blogspot.com/_ZsPZv4Ne4E/UksH0kCwMsI/AAAAAAAAAY0/qN2k57VsOdk/s1600/01kant.jpg)>. Acesso em maio 2015.



de  $e_2$  (mas  $e_2$  não é a causa de  $e_1$ ).

**Eventos simultâneos:** dois eventos  $e_1$ ,  $e_2$  e são simultâneos quando acontecem no mesmo instante (único) do tempo. Isso ocorre quando uma das duas condições é satisfeita: (1)  $e_1$  não é a causa de  $e_2$ , nem  $e_2$  é a causa de  $e_1$ ; ou (2)  $e_1$  é a causa de  $e_2$  e  $e_2$  é a causa de  $e_1$ , envolvendo-os em uma **interação mútua, recíproca e profunda**. Geometricamente, isso é representado por uma linha transversal que corta no mesmo ponto a linha do tempo dos eventos.

Provavelmente nesse segundo caso (interação mútua), Kant estava pensando na gravitação universal de Newton, que obedece a lei da ação e reação e era entendida como uma interação instantânea entre dois corpos até o início do século XX. Neste aspecto específico, Kant foi criticado pelo filósofo Arthur Schopenhauer (1788-1860), que argumentou que a causalidade implica em sucessão e, portanto, a noção de reciprocidade conduz a uma contradição: se dois eventos são a causa e efeito um do outro, então eles são sucessivos e antecedentes um do outro. Com base nisso, Schopenhauer defendeu que a concepção de reciprocidade fosse banida da metafísica por ser vazia, falsa e inválida.

As concepções kantianas de sucessão e simultaneidade envolvem o princípio da antecedência da causa, ainda que exista um problema com a noção de reciprocidade, apontado por Schopenhauer. O princípio da antecedência da causa foi fortemente divulgado pela teoria kantiana e aceito como *regra metafísica* pelos cientistas, em geral. Ele terá papel decisivo no desenvolvimento da Relatividade Restrita. As ideias de Kant são tão originais quanto as de Leibniz, e evidenciam o quão rico foi o período de críticas ao conceito newtoniano de tempo, mesmo enquanto a Mecânica Newtoniana era a teoria de maior sucesso na Física.

Outra contribuição significativa neste debate foi dada pelo matemático e físico francês Henri Poincaré (1854-1912). A descoberta e desenvolvimento das geometrias não euclidianas, na primeira metade do século XIX, causou grande impacto em suas concepções filosóficas. Essas geometrias são baseadas em um conjunto de axiomas distintos dos da geometria euclidiana. Isso levou Poincaré a concluir que os axiomas de uma geometria são convenções. Ele extrapolou esse entendimento para outros campos do saber.

Figura 30: Henri Poincaré, fotografia.



Fonte: sítio da Enciclopédia Britânica.<sup>28</sup>

Para Poincaré, os conceitos fundamentais das teorias científicas também são baseados em convenções, por exemplo, os conceitos de força, tempo e simultaneidade, tal qual os axiomas de alguma geometria. Isso significa que não tem sentido afirmar que uma teoria é verdadeira, assim como também não tem sentido falar em um sistema métrico verdadeiro (pois o metro é uma convenção). É preciso esclarecer que as leis da natureza não são convenções, mas duas teorias diferentes e equivalentes, baseadas em conceitos fundamentais distintos (força, tempo, comprimento, simultaneidade...), possuirão leis físicas distintas, mas que poderão ser traduzidas uma na outra. O papel do cientista é elaborar uma teoria livre de contradições e escolher, cuidadosamente, os conceitos fundamentais para que a teoria seja a mais simples possível. Essa postura de Poincaré, que pode ser denominada de convencionalista, o levou a elaborar reflexões filosóficas muito profundas sobre o tempo e a simultaneidade. Em 1898, ele publica um artigo chamado *La Mesure du Temps* (A Medida do Tempo), onde argumenta que

Se agora supomos que vamos adotar uma outra

---

28 Disponível em <<http://global.britannica.com/biography/Henri-Poincare>>. Acesso em junho 2015.

maneira de medir o tempo, nem por isso as experiências sobre as quais estão fundadas as leis de Newton deixariam de conservar o mesmo sentido. Só que o enunciado das leis de Newton seriam diferentes, porque seria traduzido para uma outra linguagem; evidentemente seria muito menos simples [...] O tempo deve ser definido de tal modo que as equações da mecânica sejam tão simples quanto possível (POINCARÉ, 1907, p.40, tradução nossa).

Ele também examinou o argumento de tentar estabelecer a sucessão temporal a partir de relações de causa e efeito, como fez Leibniz, ou vice versa, como fez Kant.

Quando um fenômeno nos aparece como a causa de outro, nós o vemos como anterior. É então pela causa que definimos o tempo; mas quase sempre, quando dois fatos nos parecem ligados por uma relação constante, como reconheceremos qual deles é a causa e qual é o efeito? Admitimos que o fato anterior, o antecedente, é a causa do outro, do consequente. É portanto pelo tempo que definimos a causa. Como ter uma saída para essa petição de princípio? POINCARÉ, 1995, p.34).

Sua conclusão é que esse argumento é circular, e só pode ser resolvido estabelecendo-se alguma convenção, mesmo que implícita. Com relação ao conceito de simultaneidade, Poincaré ocupou-se com profundas reflexões filosóficas. Ele analisou o seguinte exemplo:

Quando os marinheiros ou geógrafos determinam uma longitude, têm que resolver precisamente o problema que nos ocupa; sem estar em Paris, devem calcular a hora de Paris. Como se arranjam eles? Podem levar um cronômetro acertado em Paris. O problema quantitativo da simultaneidade é reduzido ao problema quantitativo da medida do tempo [...] Ou então observam um fenômeno astronômico, tal como um eclipse da Lua, e admitem que esse fenômeno é percebido simultaneamente de todos os pontos do globo.

Isso não é inteiramente verdade, já que a propagação da luz não é instantânea; se desejássemos uma exatidão absoluta, haveria uma correção a fazer, segundo uma regra complicada (POINCARÉ, 1995, p.38).

Esse exemplo sugere que é difícil separar o problema qualitativo da simultaneidade do problema quantitativo da medida do tempo, quer se utilize um cronômetro ou um raio de luz. No caso do cronômetro, de acordo com suas posições epistemológicas sobre os princípios de uma teoria, Poincaré argumenta que

não há um modo de medir o tempo que seja mais verdadeiro que outro; o que geralmente é adotado é apenas mais cômodo. De dois relógios, não temos o direito de dizer que um funciona bem e o outro funciona mal; podemos dizer apenas que é vantajoso nos reportar às indicações do primeiro (POINCARÉ, 1995, p.32).

A maneira mais vantajosa, nessa situação, é medir o tempo de acordo com a rotação da Terra, utilizando um cronômetro marítimo preciso, para que cada hora de fuso horário corresponda a 15° de longitude. Essa discussão se aplica integralmente ao método de Gemma e ao desenvolvimento dos cronômetros marítimos, discutidos anteriormente. Nesse caso, percebe-se que há uma definição implícita de tempo (rotação da Terra), e principalmente de simultaneidade (sincronização de relógios), no problema de determinação da longitude. Mas estas não são as únicas regras pelas quais é possível determinar a longitude.

No uso de um eclipse da Lua, os raios de luz advindos deste astro dificilmente chegam ao mesmo tempo para dois observadores distintos, por exemplo, um em Paris e outro no meio do oceano. Segundo Poincaré:

Em geral, negligenciamos a duração da transmissão e consideramos os dois eventos como simultâneos. Mas para sermos rigorosos, seria preciso fazer ainda uma pequena correção, através de um cálculo complicado; não a fazemos na prática, pois seria muito menor do que os erros de

observação; nem por isso sua necessidade teórica deixa de subsistir, no nosso ponto de vista, que é uma definição rigorosa (POINCARÉ, 1995, p.38).

O cálculo do desconto do tempo de propagação do raio de luz é suprimido, e uma outra regra de determinação da simultaneidade é implicitamente utilizada. Mesmo que o cálculo fosse feito, envolveria uma velocidade e, conseqüentemente, uma maneira já pré-determinada de *medir* o tempo. Na medida da velocidade da luz, por Roemer, e na determinação das distâncias interplanetárias, por Cassini e Richer, há o uso destas regras implícitas. Com base em distintas regras sobre o tempo e simultaneidade, igualmente válidas, Poincaré conclui seu ensaio dizendo que

Não temos a intuição direta da simultaneidade, nem da igualdade de duas durações. Se cremos ter essa intuição, é uma ilusão. Nós a compensamos com o auxílio de algumas regras que aplicamos quase sem perceber [...] Não há regra geral, não há regra rigorosa; [mas sim] uma multidão de pequenas regras aplicáveis a cada caso particular [...] A simultaneidade de dois eventos, ou a ordem de sua sucessão e a igualdade de duas durações, devem ser definidas de tal modo que o enunciado das leis naturais seja tão simples quanto possível. Em outros termos, todas essas regras, todas essas definições são apenas fruto de um oportunismo consciente (POINCARÉ, 1995, p.39).

No artigo *La Mesure du Temps*, Poincaré realizou estudo epistemológico sobre o *status* do tempo. Seu mérito foi ter questionado o significado objetivo do conceito de tempo e do conceito de simultaneidade. Mas a questão de como sincronizar relógios só apareceu um pouco mais tarde, ligada ao contexto da eletrodinâmica dos corpos em movimento.

O desenvolvimento teórico do eletromagnetismo, que se intensificou durante o século XIX, culminou na obra *A treatise on electricity and magnetism* (Tratado sobre eletricidade e magnetismo), de autoria do físico escocês James Clark Maxwell (1831-1879), que foi publicado em 1873. É nesta obra que estão as conhecidas equações de Maxwell, que são enunciadas abaixo no formalismo vetorial utilizado

atualmente.

Figura 31: Equações de Maxwell na forma integral.

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| $\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$                          | Lei de Gauss (eletricidade) |
| $\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$   | Lei de Gauss (magnetismo)   |
| $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt}$                           | Lei de Faraday              |
| $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$ | Lei de Ampère               |

Fonte: elaborada pelo autor.

O estabelecimento do eletromagnetismo clássico também provocou um afastamento das concepções mecanicistas da natureza, que entendiam a realidade física composta fundamentalmente por massas inerciais, discretas ou contínuas, sujeitas à forças de contato ou à distância, obedecendo as leis da Mecânica Newtoniana. A nova concepção eletromagnética da natureza privilegiava as cargas elétricas, sujeitas às equações do campo eletromagnético, e um éter eletromagnético, que preenchia todo o espaço. Segundo Alberto Villani

A versão mais radical desta maneira de conceber a natureza chegava a identificar as partículas carregadas como estruturas em movimento ou singularidades do éter, apontando então este último e as suas perturbações como a realidade fundamental de toda a natureza (VILLANI, 1985a).

A coincidência existente entre a velocidade de uma onda eletromagnética, deduzida teoricamente, e a velocidade da luz, obtida por meios experimentais, criou grande confiança de que a luz e fenômenos eletromagnéticos possuem a mesma natureza. O éter seria o suporte físico, supostamente estacionário, no qual as ondas luminosas se propagariam pelo espaço “vazio”, por exemplo entre o Sol e a Terra. Diversos experimentos procuraram medir a velocidade da Terra em

relação ao éter. O que teve mais impacto na época, devido à grande precisão, foi feito pelos cientistas Albert Michelson (1852-1931) e Edward Morley (1838-1923), em 1887, e ficou conhecido como Experimento de Michelson-Morley. Porém, seu resultado negativo sugeriu aos físicos da época que a luz tem a mesma velocidade para qualquer observador, independente de seu estado de movimento ou da fonte luminosa.

É nesse contexto que, entre 1892 e 1904, o físico holandês Hendrik Lorentz (1853-1928) desenvolveu a Teoria do Elétron, aplicando o eletromagnetismo clássico ao estudo de fenômenos ópticos e da matéria, resultando no “coroamento de um grande esforço científico de síntese entre a teoria eletromagnética e a concepção atômica da matéria”<sup>29</sup>. Pode-se dizer que Lorentz foi um precursor da física do estado sólido.

Em 1895, Lorentz elabora o Princípio dos Estados Correspondentes, que simplifica o tratamento matemático de fenômenos eletromagnéticos, pois ele

assegura a invariância das equações básicas de Maxwell de maneira que o movimento em relação ao éter não altera os fenômenos eletromagnéticos observados. Junto com o princípio dos Estados Correspondentes, é introduzido o tempo “local” [t], cujo significado é difícil de entender no contexto da obra, mas que mais parece um conceito auxiliar do que uma revisão da noção de tempo. Somente com a contribuição de Poincaré, o tempo “local” será associado à sincronização de relógios mediante pulsos de luz (VILLANI, 1985a).

Não obstante, é apenas em 1904 que Lorentz publica a versão final da sua Teoria do Elétron, quando apresenta as transformações que tornam as equações de Maxwell invariantes para diferentes observadores inerciais.

---

29 VILLANI, 1985a.

Figura 32: Transformadas de Galileu e Lorentz.

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} x' = \gamma (x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma (t - vx/c^2) \end{array} \right. \quad \text{onde } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Fonte: elaborada pelo autor.

A Transformação de Lorentz, assim denominada por Poincaré, explica o resultado negativo do Experimento de Michelson-Morley. Considerando então tanto a Teoria do Elétron quanto o Experimento de Michelson-Morley, Poincaré postula o Princípio da Relatividade, em 1904, durante uma palestra no Congresso Internacional das Artes e das Ciências, em St. Louis (EUA). Segundo esse princípio,

as leis dos fenômenos físicos devem ser as mesmas, quer para um observador fixo, quer para um observador em movimento de translação uniforme; de modo que não temos, nem podemos ter, nenhum meio de discernir se somos ou não levados num tal movimento (POINCARÉ, 1995, p. 112).

Conjugando esse princípio com a invariância da velocidade da luz, Poincaré enuncia, na mesma palestra, uma maneira de sincronizar relógios, interpretando fisicamente o tempo “local”  $t'$  que aparece na Transformação de Lorentz.

Imaginemos dois observadores que desejam acertar seus relógios por sinais ópticos; eles trocam sinais, mas como sabem que a transmissão da luz não é instantânea, tomam o cuidado de cruzá-los. Quando a estação B percebe o sinal da estação A, seu relógio não deve marcar a mesma hora que a da estação A no momento da emissão do sinal, mas essa hora aumentada de uma



constante que representa a duração da transmissão. Suponhamos, por exemplo, que a estação A envie seu sinal quando seu relógio marca a hora zero, e que a estação B o perceba quando seu relógio marca a hora  $t$ . Os relógios estão acertados se o atraso igual a  $t$  representar a duração da transmissão, e, para verificá-lo, a estação B expede por sua vez um sinal quando seu relógio marca zero; a estação A deve então percebê-lo quando seu relógio marcar  $t$ . Então os relógios estão acertados.

E de fato eles marcam a mesma hora no mesmo instante físico, mas com a condição de estarem fixas as duas estações. **Caso contrário, a duração da transmissão não será a mesma nos dois sentidos**, já que a estação A, por exemplo, vai ao encontro da perturbação óptica emanada de B, enquanto a estação B foge diante da perturbação emanada de A. Portanto, os relógios acertados desse modo não marcarão o tempo verdadeiro; marcarão o que podemos chamar de tempo local, de modo que um deles se atrasará em relação ao outro. Pouco importa, já que não temos nenhum meio de perceber isso. Todos os fenômenos que se produzirem em A, por exemplo, estarão atrasados, mas todos terão o mesmo atraso, e o observador não perceberá, já que seu relógio atrasa; assim, como manda o princípio da relatividade, ele não terá nenhum meio de saber se está em repouso ou em movimento absoluto (POINCARÉ, 1995, p. 118-119, grifo nosso).

No segundo caso de sincronização, com as estações em movimento, Poincaré já havia percebido que os relógios das estações estariam continuamente saindo de sincronia. Além disso, ele já conhecia o grupo de transformação correto (Lorentz), o Princípio da Relatividade e admitia a invariância da velocidade da luz. Porém, Poincaré relutava em abandonar o quadro conceitual da Mecânica Newtoniana, para erguer uma nova mecânica, sob novas convenções. Pode-se perguntar por que Poincaré não abandonou a distinção entre *tempo local* e *tempo verdadeiro*, já que o tempo é uma convenção, e chegou à Teoria da

## Relatividade Restrita? Uma possível resposta é

Enquanto Poincaré pode muito bem ter usado uma posição convencionalista ao falar sobre a natureza da física, em seu próprio trabalho em física teórica, ele foi tudo menos um convencionalista (GOLDBERG, 1967, tradução nossa.).

Poincaré ainda se pergunta sobre o que aconteceria caso se utilizasse outro sinal, que não o luminoso, para sincronizar os relógios, conforme seu procedimento operacional. Sua resposta é que qualquer sinal pode ser utilizado, desde que seja mantido o Princípio da Relatividade e que isso contribua para simplificar a teoria, conforme sua crença epistemológica instrumentalista. Esta resposta é compatível com os comentários filosóficos realizados em 1898, no artigo *La Mesure du Temps*.

Como se observa, a originalidade das teorias de Leibniz e Kant não esgotaram as críticas à Newton. Poincaré também contribui significativamente para a desestabilização dos conceitos newtonianos de tempo e de simultaneidade. Várias concepções muito diferentes de tempo surgiram, tais como: o tempo absoluto (Barrow e Newton); o tempo como uma convenção (Leibniz e Poincaré) e o tempo inato (Kant). Por consequência, também apareceram variadas concepções de simultaneidade: a simultaneidade absoluta (Barrow e Newton); a simultaneidade advinda de relações entre eventos (Leibniz e Kant) e a simultaneidade como convenção (Poincaré). Pode-se notar que, nesse período compreendido entre os séculos XVI e início do XX, existiu pouca linearidade nas discussões sucessivas sobre o tempo e a simultaneidade. Foi também um período riquíssimo, de verdadeira efervescência de ideias, em que a preocupação dos cientistas e dos filósofos era estabelecer uma concepção de tempo e simultaneidade livre de contradições, consistente. Estavam, portanto, trabalhando em um problema conceitual interno, tal qual os escolásticos medievais fizeram quando se debruçaram sobre a unicidade do tempo.

Apesar do uso arraigado da experimentação controlada na ciência neste período, os avanços relativos ao conceito de tempo e simultaneidade foram advindos principalmente do árduo trabalho teórico.

## 5.7 – A SIMULTANEIDADE NA RELATIVIDADE RESTRITA.

Albert Einstein (1879-1955) foi um físico alemão, autor da Teoria da Relatividade Restrita, que contribuiu de forma relevante em diversas áreas da Física, como a mecânica clássica, a Mecânica Quântica e a gravitação. Desde a juventude, Einstein se interessou pela eletrodinâmica, pelo éter, e pelo problema da sua indetectabilidade, como constam nas cartas à sua noiva, Mileva Maric, entre os anos de 1898 e 1902. Um dos problemas fundamentais em que Einstein dedicava suas reflexões era a incompatibilidade entre a Mecânica Newtoniana e o eletromagnetismo de Maxwell, mais especificamente, a impossibilidade de conciliar a transformação de Galileu com a constância da velocidade da luz.

Já trabalhando no escritório de patentes, em Berna, era parte intrínseca de suas funções analisar diversos mecanismos de sincronização de relógios de estações de trem, como, por exemplo: (1) Instalação elétrica para transmissão do tempo, número 27555 (1903), de David Perret; (2) Instalação com relógio central para a sincronização de relógios em locais diferentes, número 29073 (1904), de L. Agostineli.<sup>30</sup> Até fatos cotidianos podem tê-lo inspirado, já que em sua caminhada até o escritório de patentes ele passava próximo ao relógio da famosa torre de Kramgasse, local que possui visada direta ao relógio da torre da igreja de Muri, no subúrbio de Berna. Segundo Joseph Sauter, seu colega de trabalho na época

Einstein apontou a necessidade de uma nova definição de "sincronização" de dois relógios idênticos distantes um do outro: por sua definição, ele disse, suponha um dos relógios em uma torre em Berna e outro em uma torre em Muri (no antigo anexo aristocrático de Berna). No momento em que o relógio de Berna marca exatamente meio-dia, faz-se partir de Berna um sinal luminoso na direção de Muri; que chegará em Muri quando o relógio de Muri marcar o horário meio-dia +  $t$ ; então, refletindo o sinal na direção de Berna; se no momento em que chegar à Berna o relógio de Berna marcar meio-dia +  $2t$ , dizemos que os dois relógios estão sincronizados

---

30 JAMMER, 2006, p. 121-122.

(FLUCKINGER, 1974 apud JAMMER, 2006, p. 122, tradução nossa).

Essa definição é equivalente à de Poincaré, enunciada em 1898. Em uma palestra na Universidade de Kyoto, em 1922, Einstein contou sobre uma conversa que teve com Michele Besso, engenheiro e amigo do escritório de patentes, que teve um efeito catalisador na elaboração da Relatividade Restrita. Segundo Einstein, nessa conversa

Nós discutimos cada aspecto deste problema. Então, de repente, eu entendi onde a chave para este problema reside. No dia seguinte, voltei a ele e disse, sem sequer cumprimentá-lo: "Obrigado. Eu resolvi completamente o problema. Uma análise do conceito de tempo foi minha solução". O tempo não pode ser definido absolutamente, e existe uma relação inseparável entre o tempo e a velocidade do sinal [da luz]. Com este novo conceito, eu consegui resolver completamente todas as dificuldades pela primeira vez. Dentro de cinco semanas, a Teoria da Relatividade Especial foi concluída (EINSTEIN, 1982, apud JAMMER, 2006, p. 107, tradução nossa).

Por último, o físico e jornalista alemão Albrecht Fölsing expecula que Einstein e Besso tiveram acesso a uma cópia extraoficial da coletânea de ensaios *O Valor da Ciência*, de 1904, que contém o artigo *La Mesure du Temps* (1898), onde Poincaré apresenta seu método de sincronização de relógios. Segundo Fölsing,

Einstein e Besso descobriram alguns aspectos do procedimento de sincronização de Poincaré que podem ter escapado ao próprio Poincaré. Como seria - os dois amigos, até então céticos sobre o "tempo real", podem ter se perguntado - se o tempo definido pelo experimento de Poincaré não fosse apenas um dispositivo matemático para o "tempo local" de Lorentz, mas na verdade tudo que um físico poderia esperar de um conceito significativo? É certo que isso acarretará em um "tempo" diferente para cada sistema inercial, mas

a constância da velocidade da luz para qualquer observador seria, nesse caso, inerente à definição de simultaneidade de Poincaré e não, como no caso de Lorentz, ser forçosamente provocada por um laborioso ajuste da teoria (FöLSING, 1997 apud JAMMER, 2006, p. 108, tradução nossa).

O próximo passo foi a publicação de seu famoso artigo chamado *A Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento*, na prestigiada revista *Annalen der Physik*, no número 17, páginas 891 até 921, em 1905. Na primeira seção deste artigo, denominada §1- *Definição da simultaneidade*, Einstein ocupa-se de uma definição (local) de simultaneidade:

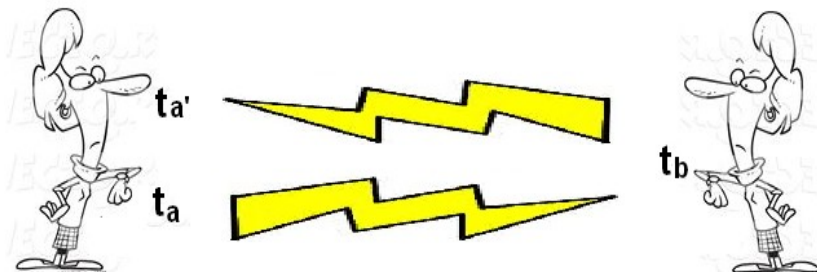
Se, por exemplo, eu digo “o trem chega aqui às 7 horas”, isso significa algo como, “a posição do ponteiro pequeno do meu relógio às 7 e a chegada do trem são eventos simultâneos” [...] é possível superar todas as dificuldades envolvidas na definição de “tempo” simplesmente substituindo a posição do ponteiro pequeno de meu relógio por “tempo” (EINSTEIN, 1923, tradução nossa).

Em seguida, ele propõe uma maneira de sincronizar relógios “distantes”, que é equivalente a definir operacionalmente a simultaneidade não-local.

Se há um relógio no ponto A do espaço, então um observador localizado em A pode certificar o tempo dos eventos nas imediações de A, determinando a posição do ponteiro do relógio que é simultânea com esses eventos. Se existe também um relógio no ponto B, que em todos os aspectos se assemelha ao relógio em A, então o tempo dos eventos na imediata vizinhança de B pode também ser avaliado por um observador situado em B. Mas não é possível comparar o tempo de um evento em A com outro em B, sem uma estipulação adicional; até agora só definimos um “tempo-A” e um “tempo-B”, mas não um “tempo” comum para A e B. Este último pode agora ser determinado estabelecendo, por

definição, que o “tempo” necessário para a luz viajar de A até B é igual ao “tempo” necessário para que ela viaje de B até A. Suponha que um raio de luz parta de A para B no instante “tempo-A”  $t_a$ , é refletido de B para A no instante “tempo-B”  $t_b$ , e chega de volta a A no “tempo-A”  $t_a'$ . Os dois relógios estão sincronizados por definição se  $t_b - t_a = t_a' - t_b$  (EINSTEIN, 1923, tradução nossa).

Figura 33: Definição de simultaneidade de 1905.



Fonte: elaborada pelo autor.

Em outras palavras, os relógios estarão sincronizados se o tempo de ida do sinal é igual ao tempo de volta. Essa definição é equivalente à de Poincaré, discutida anteriormente. **A simultaneidade não-local é determinada se, e somente se, eventos distantes ocorrem no mesmo instante  $t$  de relógios sincronizados junto aos eventos.** Einstein assume que esse procedimento de sincronização proposto é livre de contradições e que valem as seguintes relações: (1) se o relógio A está sincronizado com B, então B está sincronizado com A; (2) se o relógio A está sincronizado com B, e por sua vez B está sincronizado com C, então A e C também estão sincronizados. Isso confere ao procedimento as propriedades *simétrica* e *transitiva*. Dessa forma, torna-se possível sincronizar uma infinidade de relógios, tantos quanto se queiram, em um dado referencial inercial.

Outra característica importante é que o conceito de tempo que resulta dessa definição é **dependente de processos físicos**, visto que é obtido a partir de uma definição operacional de simultaneidade. Nota-se que Einstein não opta *a priori* por um conceito de tempo absoluto, como fez Newton. Mas isso fica mais evidente quando Einstein inicia a

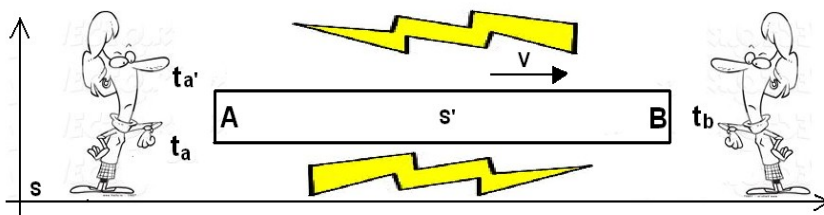
segunda seção do seu artigo, intitulada § 2- *Sobre a relatividade do comprimento e do tempo* . Nesta seção, são enunciados os dois postulados da Relatividade Restrita: (1) Princípio da Relatividade; (2) Constância da velocidade luz. Em seguida, Einstein prova através de um experimento mental que a simultaneidade é um conceito relativo. O argumento é o seguinte:

*Suponha um sistema de coordenadas  $S$ , em relação ao qual se move com velocidade uniforme  $v$  um bastão rígido de extremidades  $A$  e  $B$  (em repouso em um sistema de coordenadas  $S'$  que o acompanha). Em cada extremidade desse bastão há um observador com um relógio sincronizado com o sistema estacionário  $S$ . Suponha que um raio de luz saia de  $A$ , seja refletido em  $B$ , e retorne até  $A$ , de forma análoga à definição de simultaneidade já exposta. Considerando a velocidade da luz constante e a definição de simultaneidade, temos:*

$$t_b - t_a = \frac{AB}{c - v} \quad (5)$$

$$t_a' - t_b = \frac{AB}{c + v} \quad (6)$$

Figura 34: Relatividade da simultaneidade de 1905.



Fonte: elaborada pelo autor.

*A sincronização  $t_b - t_a = t_a' - t_b$ , que vale no sistema  $S$ , não é satisfeita em  $S'$ , caso  $v$  seja diferente de zero.<sup>31</sup>*

31 Adaptado de EINSTEIN, 1923.

Com essa demonstração, Einstein esclarece o significado da relatividade da simultaneidade: ele é relativo ao sistema de coordenadas (inercial) adotado. A simultaneidade não-local deixa de ser uma relação binária, entre dois eventos, para ser uma relação ternária, entre dois eventos mais um sistema de coordenadas. Para definir o conceito de simultaneidade não-local, a elegante estratégia de Einstein foi transformar a simultaneidade não-local em um problema de sincronização de relógios, este por sua vez redutível à noção de simultaneidade local.

Até 1905 vários fenômenos eram tidos como apresentando velocidade de propagação supraluminal. Por exemplo, os fenômenos gravitacionais, de propagação instantânea e utilizado por Kant em sua definição de simultaneidade. Outro exemplo é apontado pelo historiador da ciência Roberto Martins.

A velocidade da luz em meios transparentes (ar, água, vidro) é menor do que no vácuo. No entanto, ocorre que a propagação da luz colorida (por exemplo vermelha) em um material transparente também colorido e que absorve fortemente aquela cor (vermelha, no caso), pode ocorrer com uma velocidade maior do que a luz no vácuo (MARTINS, 1986).

Na formulação original da Relatividade Restrita, de 1905, não se reconhece a velocidade da luz como o limite de todas as interações da natureza. Na verdade, é dito que

Para  $v=c$  todos os objetos que se movem, vistos de um referencial estacionário, encolhem para uma figura plana. Para velocidades maiores que a luz nossas deliberações [discussões do artigo] tornam-se sem sentido; devemos, no entanto, considerar o que se segue: de que a velocidade da luz na nossa teoria desempenha o papel físico de uma velocidade infinitamente grande (EINSTEIN, 1923, tradução nossa).

Einstein prefere não tratar do caso de sinais supraluminais, mas



eles existem e são de consideração geral da comunidade científica. **Também é importante notar que os postulados da Relatividade Restrita, como propostos originalmente, não proibem diretamente sinais supraluminais.** Mas qual o problema da existência destes sinais? Para entender essa questão, é preciso retomar o *Princípio da Antecedência da Causa*. Segundo Kant, que utiliza esse princípio como um critério de objetividade temporal: um evento  $e1$  é dito preceder  $e2$ , **se existe uma lei da natureza** que relaciona estes dois eventos, onde  $e2$  é um efeito de  $e1$ . Ocorre que interações físicas supraluminais violam esse princípio, por exemplo

Suponhamos agora, como hipótese de trabalho, que algum tipo de influência física possa propagar-se com velocidade maior do que a da luz [no vácuo]. Suponhamos que o evento  $e1$  é o apertar de um botão em um certo ponto e que, ao apertar-se esse botão, é enviado pelo espaço um sinal com velocidade maior do que a luz, que vai ser captado em um ponto distante e produzir a detonação de uma bomba nesse ponto. A detonação da bomba é o acontecimento  $e2$ . Ora, como essa influência é, por hipótese, mais rápida que a luz, o acontecimento  $e2$  ocorre antes que um sinal luminoso emitido em  $e1$  possa chegar ao local da bomba. Assim sendo, como já foi explicado, haverá sistemas de referência para os quais o acontecimento  $e2$  ocorreu antes que o acontecimento  $e1$ , ou seja, a bomba explodiu antes que o botão fosse apertado; o efeito acontece antes da causa (MARTINS, 1986).

Esse problema suscita três alternativas: (1) não vale o *Princípio da Antecedência da Causa*; (2) a velocidade limite de qualquer interação da natureza é a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) e (3) a recém criada Relatividade Restrita está errada. Diante desse impasse, em 1907 Einstein<sup>32</sup> optou pela segunda alternativa, e incluiu, adicionalmente aos postulados, que nenhum sinal pode se propagar mais rápido que  $c$ , sem sequer discutir as outras alternativas. Como sinais supraluminais eram de consideração geral da comunidade científica da época, houve um intenso trabalho (e apoio) de vários físicos, como Arnold Sommerfeld,

32 EINSTEIN, 1907a.

para mostrar que esses sinais supraluminais não são capazes de transmitir informação, portanto não violam o *Princípio da Antecedência da Causa*. Aproximadamente em 1920, os físicos em geral já estavam convencidos que a velocidade da luz no vácuo é o limite para interações da natureza.

Não seria exagero afirmar que, a partir de 1907, a Relatividade Restrita, e a definição de simultaneidade, tomam um significado muito mais profundo do que o próprio Einstein imaginou. Talvez isso seja uma das motivações que levou Einstein a reformular sua definição de simultaneidade quatro vezes, entre 1907 e 1914<sup>33</sup>, em diversas publicações, originalmente em língua alemã. Pode-se encontrá-las reunidas em inglês na monumental obra *The Collected Papers of Albert Einstein*, publicada pela Universidade de Princeton.

Em 1917, Einstein elabora uma das definições de simultaneidade mais conhecidas, que foi publicada originalmente em alemão, no livro *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie: Gemeinverständlich*, e que está disponível em inglês (*Relativity: The Special and the General Theory: A Popular Exposition*) e em português (*A teoria da Relatividade Especial e Geral: Uma exposição popular*).<sup>34</sup> Trata-se de uma obra de divulgação científica, escrita logo após a elaboração da Relatividade Geral. A definição apresentada neste livro é importante por vários motivos: (1) é bastante diferente das anteriores, pois utiliza dois raios e um ponto médio; (2) é utilizada por muitos livros de introdução à Relatividade Restrita (3) é idêntica ao método de Santo Agostinho, proposto quando elaborou sua refutação da Astrologia.

A definição do ponto médio encontra-se no capítulo 8, intitulado *Sobre a idéia de tempo na Física*, onde Einstein faz uso do seguinte experimento mental: dois raios atingem dois pontos, A e B, de uma linha de trem, distantes um do outro e simultaneamente. Então Einstein se pergunta: como verificar ao certo se os eventos foram simultâneos? E responde: a simultaneidade entre dois eventos não existe até que se possa verificá-la operacionalmente. Nesse contexto, Einstein propõe o seguinte método:

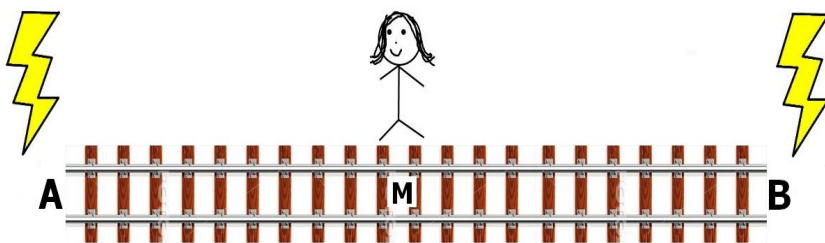
A linha que conecta AB, considerada ao longo dos trilhos, deve ser medida e um observador colocado no ponto médio M da distância AB. Ao

33 EINSTEIN 1907b, 1910, 1911, 1914.

34 EINSTEIN 1917, 1920, 1999.

observador deve ser fornecido algum dispositivo (por exemplo dois espelhos inclinados a  $90^\circ$ ) que permita observar visualmente ambos os locais A e B. Se o observador perceber os dois raios simultaneamente, eles são simultâneos (EINSTEIN, 1917 apud JAMMER, 2006, p. 130. ).

Figura 35: Definição da simultaneidade de 1917.



Fonte: elaborada pelo autor.

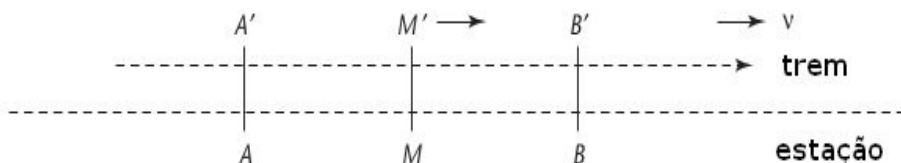
Existem duas diferenças cruciais entre a definição de 1905 e esta, de 1917. Em primeiro lugar, esta nova definição não faz uso de relógios, mas ainda assim tem como estratégia geral a transformação de um problema de simultaneidade não-local em um problema de simultaneidade local, pois os raios são observados no mesmo ponto do espaço (ponto médio). Ela usa dois raios, em vez de um, que se propagam simultaneamente pelo espaço, e por isso é um procedimento operacional idêntico ao método de Santo Agostinho. A diferença para Santo Agostinho é que, como os mensageiros são sinais luminosos, a igualdade da velocidade de propagação é garantida de antemão, por causa do primeiro postulado da invariância da velocidade da luz. Um fato curioso é que Einstein declara, no prefácio do livro de 1917, que sua intenção era expor a Relatividade Restrita “na sequência em que foi realmente concebida”<sup>35</sup>, o que suscita especulações em torno do papel desta definição de simultaneidade na gênese da relatividade. Essa afirmação de Einstein é corroborada pelo psicólogo Max Wertheimer (1880-1943), que teve um relacionamento de amizade com Einstein

35 EINSTEIN, 1917 apud JAMMER, 2006, p. 121, tradução nossa.

desde 1916, e está exposta em sua obra *Productive Thinking*<sup>36</sup>, no capítulo dez, intitulado *Einstein: the Thinking that led to the Theory of Relativity*.

Para demonstrar a relatividade da simultaneidade, Einstein utiliza o seguinte experimento mental: um trem ( $S'$ ) atravessa uma estação de trem ( $S$ ) com velocidade constante ( $v$ ).

Figura 36: Experimento do trem-estação.



Fonte: adaptado de Jammer (2006, p. 132).

Dois raios (eventos) atingem respectivamente dois pontos A e B, e são simultâneos em relação ao referencial da estação de trem ( $S$ ). Einstein se pergunta: esses dois eventos também serão simultâneos em relação ao trem ( $S'$ )? Dizer que os eventos em A e B são simultâneos com relação à estação de trem significa que os raios de luz, oriundos dos pontos A e B, chegam simultaneamente no ponto médio M.

Mas os eventos em A e B também correspondem às posições A' e B' no trem. Seja M' o ponto médio de distância A  $\rightarrow$  B do trem que se desloca. Quando os relâmpagos ocorrem (observados a partir da estação), o ponto M' coincide naturalmente com o ponto M, mas movendo-se para a direita da figura com a mesma velocidade  $v$  do trem. Se um observador sentado na posição M' no trem não possuísse essa velocidade ( $v$ ), então ele iria ficar permanentemente em M, e os raios de luz emitidos pelo relâmpago em A e B teriam que alcançá-lo simultaneamente, ou seja, eles [raios] se encontrariam apenas onde ele [observador] está situado. Agora na realidade (considerado com

36 WERTHEIMER, 1945, p. 213–233.

referência a estação de trem), ele [observador em M'] está se movendo ao encontro do feixe de luz vindo de B, enquanto ele também está se movendo à frente do feixe de luz vindo de A. Assim, o observador verá o feixe de luz emitido de B mais cedo do que ele vai ver o que foi emitido de A. Observadores que tomam o trem como referência devem, portanto, chegar à conclusão de que o relâmpago em B ocorreu mais cedo do que o relâmpago em A. Chegamos assim ao resultado importante: eventos que são simultâneos com relação à estação de trem não são simultâneos em relação ao trem, e vice-versa (relatividade da simultaneidade). Todo referencial (sistema de coordenadas) tem o seu tempo próprio; a menos que nos seja dito o corpo-referência sobre o qual uma afirmação sobre o tempo é feita, não há sentido em uma afirmação sobre o tempo de um evento (EINSTEIN, 1917 apud JAMMER, 2006, p. 132.).

Pode-se notar, pelo rico período entre 1905 e 1917, que a formulação original da Relatividade Restrita, de 1905, estava longe de ter sua forma final. Além das próprias contribuições adicionais de Einstein, outros, como o físico e matemático alemão Hermann Minkowski (1864-1909), contribuíram significativamente no desenvolvimento da teoria. Minkowski foi o responsável, por exemplo, por criar a formulação geométrica da Relatividade Restrita, que teve importância fundamental no desenvolvimento da Relatividade Geral, em 1916.

O caminho trilhado por Einstein, que incluiu um grande período de imersão em questões teóricas de seu tempo, considerações empíricas, criatividade, coragem e um bom tempo desenvolvendo a teoria após sua primeira publicação em 1905, ilustra que não há um método rígido, algorítmico, para construir o conhecimento científico. O ano de 1905 marca o início do desenvolvimento dessa teoria, em que, expondo-a à crítica de seus pares, Einstein é obrigado a continuar trabalhando intensamente nela.

Além disso, as críticas aos conceitos newtonianos feitas por Leibniz, Kant e Poincaré demonstram que o tempo e a simultaneidade absolutas há muito tempo já eram criticados abertamente, e por

personalidades de peso do mundo acadêmico. O método de sincronização de relógios de Poincaré provavelmente exerceu influência considerável no contexto da gênese da Relatividade Restrita, como argumentado por Fölsing.

A solução da incompatibilidade entre o eletromagnetismo de Maxwell e a transformação de Galileu, utilizada na Mecânica Newtoniana, envolveu uma revisão do conceito de simultaneidade e tempo e resultou na elaboração de uma nova mecânica. Essa revisão conceitual teve efeito catalisador no contexto final da elaboração do artigo de 1905. Laudan<sup>37</sup> chama esse tipo de incompatibilidade entre teorias de *Problema Conceitual Externo*, por se tratar de uma incompatibilidade entre corpos teóricos distintos. Einstein foi responsável por uma grande síntese na Física, unindo áreas até então separadas, evidenciando que a atividade científica não ocorre apenas em ramos cada vez mais especializados de uma ciência.

Nos anos seguintes ao artigo de 1905, a teoria de Einstein foi tida como uma modificação da eletrodinâmica de Lorentz (Teoria do Elétron, de 1904), que era a teoria prevalecente. Filósofos em geral também não se envolveram com os fundamentos da Relatividade Restrita antes da década de 1920. O sucesso da Relatividade Restrita se confunde com a história da Relatividade Geral. A notoriedade de Einstein iniciou-se após a primeira verificação experimental da Relatividade Geral, que ocorreu no eclipse de 1919, e foi o estopim para que cientistas e filósofos se voltassem decisivamente para os trabalhos de Einstein, incluindo também a Relatividade Restrita. Após 1920, Einstein teve de lidar com todo tipo de críticas, ainda mais porque “a relatividade da simultaneidade se tornou também o primeiro grande tema de disputa entre defensores e opositores da teoria da relatividade” (JAMMER, 2006, p. 116).

Antecipando algumas críticas, já em 1917 Einstein complementa a definição de simultaneidade com o esclarecimento adicional que as velocidades de propagação da luz nos trajetos  $A \rightarrow M$  e  $B \rightarrow M$  (conforme a Figura 36) são iguais. Mas Einstein chama a atenção de que o uso dessa suposição (constância da luz) só pode ser feita se já se dispuser de uma maneira de medir o tempo, levando a uma definição circular. Após o próprio Einstein antecipar essa crítica, ele responde que

Esta definição pode ser mantida, porque na

---

37 LAUDAN, 2011, p. 71.

realidade ela não assume absolutamente nada sobre a luz. Existe apenas uma exigência a ser feita para uma definição de simultaneidade, que é: que em cada caso concreto, ela deve fornecer-nos uma decisão empírica sobre se a concepção definida foi ou não satisfeita. Que essa definição satisfaz a essa demanda é indiscutível. Que a luz requer o mesmo tempo para percorrer o caminho  $A \rightarrow B$  e também  $B \rightarrow A$  não é, na realidade, nem uma suposição nem uma hipótese sobre a natureza física da luz, **mas uma estipulação que eu faço por livre arbítrio**, a fim de chegar a uma definição de simultaneidade (EINSTEIN, 1917 apud JAMMER, 2006, p. 131, tradução e grifo nosso).

Um dos maiores críticos e comentadores de Einstein foi o filósofo alemão Hans Reichenbach (1891-1953), que publicou uma série de obras dedicadas à análise do conceito de espaço e tempo na relatividade. Na primeira crítica, em 1920 Reichenbach observa que

Há uma certa arbitrariedade em qualquer sistema de coordenada temporal. Esta arbitrariedade é reduzida ao mínimo se a velocidade de propagação do processo, cuja necessidade na definição de sincronismo tem sido apontada por Einstein, é suposta constante, independente da direção, e igual para todos os sistemas de coordenadas (REICHENBACH, 1965 apud JAMMER, 2006, p. 174, tradução nossa).

Einstein usou o termo *estipulação* em pelo menos dois momentos, quando disse (1) no artigo de 1905, que “não é possível comparar o tempo de um evento em A com um em B, sem uma estipulação adicional”<sup>38</sup>; que é “o tempo” necessário para a luz viajar de A até B é igual ao “tempo” necessário para viajar de B até A”<sup>39</sup>; (2) em 1917, que “a luz requer o mesmo tempo para percorrer o caminho  $A \rightarrow B$  e também  $B \rightarrow A$ , e que isto não é nem uma suposição nem uma hipótese sobre a natureza física da luz, mas uma estipulação que eu faço

---

38 EINSTEIN, 1923, tradução nossa.

39 Id.

por livre arbítrio, a fim de chegar a uma definição de simultaneidade”.<sup>40</sup>

Na segunda crítica, Reichenbach (1922) diz que seria errôneo acreditar que a definição de simultaneidade apresentada por Einstein seja mais correta do que outras definições, entretanto, admite que a definição escolhida é bastante proveitosa. Uma das vantagens é o fato de que ela é transitiva, ou seja, se o evento A é simultâneo com B, e B é simultâneo com C, então A e C também são simultâneos.

Aprofundando-se ainda mais no tema, Reichenbach (1922) formula uma axiomatização da Relatividade Restrita, argumentando pela convencionalidade da definição de simultaneidade, mais conhecida como *Tese da Convencionalidade*. Discutindo o papel dos axiomas, Reichenbach argumenta que os axiomas da Física

não só devem satisfazer as exigências lógicas de consistência, independência, unicidade e completude, como os axiomas da matemática, mas, em contraste com os últimos, eles não devem ser arbitrários, mas verdadeiros, pois eles “contém toda a teoria implicitamente”. Por outro lado, “as definições são arbitrárias, pois elas não são nem verdadeiras nem falsas” (JAMMER, 2006, p. 175, tradução nossa).

A definição de simultaneidade de Einstein é, para a filosofia de Reichenbach, o que se chama de *Definição Coordenativa*. Diferente das definições conceituais, onde se esclarece um conceito por meio de outros conceitos, a definição coordenativa é o meio pelo qual os termos primitivos, postulados, leis e princípios de uma teoria adquirem significado empírico com sentenças observacionais. Elas são arbitrárias, portanto, a noção de verdadeiro ou falso não se aplica.

Einstein tem dois argumentos contra a interpretação convencionalista de Reichenbach: (1) segundo o artigo de 1905, “de acordo com a experiência, postula-se que a quantidade  $2 AB / (t_a' - t_a) = c$  é uma constante universal (velocidade da luz no espaço vazio)”.<sup>41</sup>; (2) na obra de 1917, Einstein diz que “a suposição de que esta velocidade [da luz] depende da direção “no espaço” é, em si, improvável”.<sup>42</sup> Einstein provavelmente estava se referindo à experiência de Michelson–

40 EINSTEIN, 1917 apud JAMMER, 2006, p. 132 .

41 EINSTEIN, 1905 apud JAMMER, 2006, p. 116, tradução nossa.

42 EINSTEIN, 1917 apud JAMMER, p. 136 tradução nossa.



Morley, em 1887, que não detectou qualquer movimento relativo da Terra em relação ao éter eletromagnético.

Entretanto, em uma carta, endereçada a seu amigo André Merz, em 1924, Einstein diz que “a teoria da relatividade envolve convenções, e entre elas está o conceito de simultaneidade”<sup>43</sup>. O físico e historiador da ciência Max Jammer, autor de uma das obras mais completas sobre o desenvolvimento do conceito de simultaneidade<sup>44</sup>, conclui que, com relação ao conceito de simultaneidade, “Einstein pode ser classificado como um convencionalista, mesmo que às vezes tenha feito declarações não totalmente consistentes com esta posição” (JAMMER, 2006, p. 137, tradução nossa.).

Ao longo do século XX, surgiram várias formulações da relatividade que não fazem o uso do postulado da luz ou fazem qualquer referência importante ao conceito de simultaneidade.<sup>45</sup> Isso sugere que o procedimento de sincronização de relógios, proposto por Einstein em 1905, possa não ser tão fundamental na formulação da relatividade, se comparado aos anos anteriores em que Einstein passou refletindo sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento.<sup>46</sup>

As numerosas contribuições que Einstein recebeu, tanto críticas quanto de apoio, principalmente após 1920, também indicam que esta teoria não é obra exclusiva de um gênio isolado, mas de uma comunidade científica em um período de efervescência de ideias. A imagem popularmente arraigada de que Einstein criou a Relatividade Restrita em um único artigo em 1905, em trabalho solitário, dificilmente se sustenta frente aos fatos apresentados. O contexto histórico do surgimento e desenvolvimento desta teoria foi muito mais complexo do que o apresentado aqui. Entretanto, espera-se ter evidenciado que o trabalho colaborativo foi extremamente importante para que a Relatividade Restrita se tornasse uma das teorias físicas de maior sucesso na história da ciência.

---

43 JAMMER, 2006, p. 136, tradução nossa.

44 JAMMER, 2006.

45 MERMIN, 1984; KAUFFMAN, 1985; FIELD, 2001; e FRIEDMAN e GOFMAN, 2002.

46 NORTON, 2004.



## 6 METODOLOGIA

O passo seguinte da pesquisa foi realizar a aplicação e avaliação do módulo de ensino em uma disciplina de História da Física, buscando analisar as discussões conceituais e epistemológicas geradas, além de indícios de ressignificação do conceito de simultaneidade. Este capítulo visa esclarecer os aspectos metodológicos envolvidos nesta etapa.

### 6.1 ORIENTAÇÕES METODOLÓGICAS

Considerando os objetivos propostos nesta pesquisa, a avaliação da etapa de aplicação do módulo de ensino tem as seguintes finalidades: (1) descrever o teor das discussões realizadas; (2) relatar o posicionamento epistemológico dos alunos referente ao conteúdo do módulo de ensino; (3) identificar indícios de ressignificação do conceito de simultaneidade. Tal abordagem é do tipo *descritiva*, que segundo Trivinõs (1987, p. 110), é muito comum na pesquisa em Educação.

Além da característica predominantemente descritiva, a fonte direta dos dados foi o ambiente natural da pesquisa (sala de aula) e o pesquisador foi elemento chave no processo (aplicação do módulo de ensino, coleta e interpretação dos dados). A coleta dos dados não seguiu um roteiro rigidamente pré-estabelecido. Foi preciso utilizar-se de instrumentos e estratégias que pudessem se adaptar de acordo com a necessidade e a oportunidade, visando capturar a perspectiva (epistemológica e conceitual) dos participantes sobre o tema à medida que as discussões avançavam. Essas particularidades, acima descritas, caracterizam esse estudo como uma *pesquisa qualitativa* (LUDKE e ANDRÉ, 1988, p. 11-12).

A pesquisa qualitativa possui características diferentes da pesquisa quantitativa, que é largamente utilizada nas ciências naturais.

A pesquisa quantitativa caracteriza-se por dados extraídos de um grande número de casos sobre um pequeno número de variáveis. A pesquisa qualitativa é caracterizada por dados obtidos a partir de um pequeno número de casos sobre um grande número de variáveis [...] A distinção mais importante entre pesquisa quantitativa e

qualitativa, segundo o meu ponto de vista, é de natureza epistemológica entre as generalizações que os dois tipos de pesquisa proporcionam (STAKE, 1986).

Enquanto pesquisas quantitativas buscam estabelecer relações universais entre variáveis, pesquisas qualitativas buscam a complexidade da experiência individual, e permitem a realização de *generalizações naturalísticas*.

A grande contribuição da pesquisa qualitativa, para a maioria dos seus usuários, é a de proporcionar uma oportunidade para examinar a experiência vicária do estudo de caso com base em experiências anteriores. Isso é semelhante à aprendizagem experiencial comum. As generalizações resultantes são por mim chamadas de “generalizações naturalistas”. A pesquisa qualitativa não fornece generalizações naturalistas, mas sim propicia ao leitor ou ao usuário chegar às suas próprias generalizações (STAKE, 1986).

Neste tipo de generalização, o leitor associa os resultados da pesquisa (qualitativa) às suas próprias experiências individuais sobre o tema, e julga se ela é pertinente aos casos em que já viveu. É neste contexto que se situa a abrangência dos resultados dessa pesquisa.

O módulo de ensino foi inicialmente concebido para um cenário bastante específico, uma disciplina de História da Física, o que tornou inviável efetuar diversas aplicações no contexto de um trabalho de mestrado. Foi realizada uma aplicação de **sondagem** e outra **definitiva**, logo, esta etapa da pesquisa tratou-se de um *estudo de caso*. Segundo Ludke e André (1988, p. 18-21), o estudo de caso tem algumas particularidades importantes:

- Aceita a incorporação de novos elementos na pesquisa, que emergem no desenrolar da mesma;
- Enfatiza a interpretação dos fenômenos intimamente relacionada com o contexto da pesquisa;

- Busca a compreensão de um caso em particular da realidade, considerando a complexidade natural dos fenômenos educacionais;
- Utiliza uma variedade de fontes de informação.

Outro aspecto importante é que há um valor intrínseco no caso estudado.

[...] o objeto estudado é tratado como único, uma representação singular da realidade que é multidimensional e historicamente situada. Desse modo, a questão sobre o caso ser ou não “típico”, isto é, empiricamente representativo de uma população determinada, torna-se inadequada [...] (LUDKE E ANDRÉ, 1988, p. 21).

Apesar do alcance bastante limitado do estudo de caso, Trivinõs (1987, p. 111) chama à atenção que o conhecimento aprofundado sobre uma realidade particular permite formular hipóteses para o encaminhamento de pesquisas complementares, ou seja, tem um caráter progressivo para o estudo de um tema.

A análise e interpretação do material será feita nos marcos teóricos da Análise do Conteúdo (BARDIN, 1977), que “é um método que pode ser aplicado tanto na pesquisa quantitativa como na investigação qualitativa” (TRIVINÕS, 1987, p. 158) e porque “qualquer técnica (entrevista, questionário, etc.) adquire força e seu valor exclusivamente mediante o apoio de um determinado referencial teórico” (TRIVINÕS, 1987, p. 159).

## 6.2 O CONTEXTO DE APLICAÇÃO E OS SUJEITOS DA PESQUISA

A aplicação do módulo de ensino ocorreu no segundo semestre de 2014, na disciplina de Evolução dos Conceitos da Física, obrigatória nos cursos de Licenciatura e Bacharelado em Física da UFSC, com carga horária de 72 horas e ofertada no último semestre de ambos os cursos. A disciplina se desenrola a partir de cinco livros produzidos para esta finalidade, intitulados:

- *Força e movimento: de Thales a Galileu* (PEDUZZI, 2015a) ;
- *Da física e da cosmologia de Descartes à gravitação newtoniana* (PEDUZZI, 2015b) ;
- *Do átomo grego ao átomo de Bohr* (PEDUZZI, 2015c) ;
- *A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica* (PEDUZZI, 2015d) ;
- *Do próton de Rutherford aos quarks de Gell-Mann, Nambu...* (PEDUZZI, 2010) .

Estes materiais didáticos abrangem inúmeros conceitos e teorias na história da Física, desde a Antiguidade até o século XX. Há também um sítio<sup>47</sup> da disciplina, que contém materiais hipermídia, livros, artigos, módulos de ensino e dissertações relacionadas com a disciplina.

Em um estudo recente, Nicolodelli (2011) classificou as disciplinas voltadas à HFC nos cursos de Licenciatura e Bacharelado em Física em 19 (dezenove) Instituições de Ensino Superiores (IES) federais brasileiras, totalizando 32 (trinta e duas) disciplinas ofertadas. Segundo esse estudo, existem 3 tipos de disciplinas:

---

47 Disponível em <<http://evolucaodosconceitos.wix.com/historia-da-ciencia>>. Acesso em outubro de 2015.

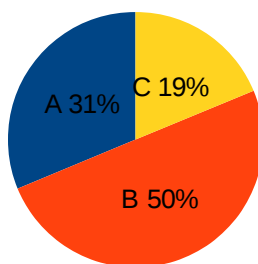
Tabela 7: Categorias das disciplinas.

| <b>Categorias</b> | <b>Classificação</b>   | <b>Quantidade</b> |
|-------------------|--|-------------------|
| A                 | Disciplina(s) específica(s) presente(s) no currículo do curso de física, que contempla(m) a história da física, porém sem articulação com a Filosofia da Ciência.                              | 10                |
| B                 | Disciplina(s) específica(s), no currículo do curso de física, referente(s) à história da física, com ênfase na articulação histórico-epistemológica.   | 16                |
| C                 | Disciplina(s) cuja(s) ementa(s) aponta(m) para estudos da Filosofia da Ciência desvinculados da história, ou que sugere(m) a utilização da História da Ciência de forma meramente ilustrativa. | 6                 |

Fonte: adaptada de Nicolodelli (2011).

Para uma melhor visualização, construiu-se o seguinte gráfico:

Figura 37: Distribuição das disciplinas.



Fonte: elaborada pelo autor.

A disciplina *Evolução dos Conceitos da Física* fomenta a articulação entre História e a Filosofia da Ciência, portanto situa-se na categoria B. Essa é a categoria da maioria das disciplinas analisadas pelo estudo de Nicolodelli (2011), e que pode aumentar substancialmente as possibilidades de discussões conceituais e epistemológicas durante a aplicação do módulo de ensino.

O módulo de ensino foi aplicado ao final do conteúdo histórico de relatividade da referida disciplina, que é abordado pelo livro *A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica* (PEDUZZI, 2015d). Os tópicos tratados neste livro são, sucintamente:

- Referencial absoluto de Newton, os experimentos do balde e dos globos em rotação, as críticas de Mach aos conceitos newtonianos;
- O princípio da relatividade de Galileu, a Transformação de Galileu e suas consequências;
- Desenvolvimento histórico abrangente sobre a luz, da Antiguidade grega até a teoria ondulatória no século XIX;
- O surgimento do eletromagnetismo de Maxwell, o papel do éter e os experimentos para detectar a velocidade da Terra em relação ao éter.
- O princípio da relatividade na visão de Poincaré e as contribuições de Lorentz;
- A Teoria da Relatividade Especial: os postulados, a simultaneidade, sincronização de relógios, a relatividade da simultaneidade, a contração de Lorentz-Fitzgerald e a dilatação temporal.
- A Teoria da Relatividade Geral: a gênese do princípio da equivalência, referenciais acelerados, gravitação, as primeiras corroborações desta teoria.
- Discussões histórico-epistemológicas sobre o desenvolvimento da relatividade especial e geral.

Com relação ao momento pedagógico em que o módulo de ensino foi aplicado, ele resgatou historicamente o conceito de simultaneidade e promoveu a discussões dentro do contexto da Relatividade Restrita, nas duas primeiras décadas desta teoria. Ou seja, o módulo de ensino complementou e aprofundou o tópico sobre relatividade trabalhado na disciplina, que tem como material base o livro supracitado.



Isto não é obra da coincidência, mas na verdade fruto do uso da disciplina de Evolução dos Conceitos da Física como ambiente natural da pesquisa em educação (sala de aula), tratando-se de uma prática docente crítica e reflexiva voltada para a melhoria da educação científica nacional, levada adiante pelo orientador deste trabalho.

A amostra foi constituída de 7 (sete) alunos, sendo 3 (três) do bacharelado, 3 (três) da licenciatura e 1 (um) aluno intercambista de Portugal. Para a análise dos dados, os alunos foram codificados sequencialmente, sendo ALUNO 1 até ALUNO 7, conforme a tabela abaixo.

Tabela 8: Codificação dos alunos.

| <b>Identificação</b> | <b>Curso</b>  |
|----------------------|---------------|
| ALUNO 1              | Bacharelado   |
| ALUNO 2              | Intercambista |
| ALUNO 3              | Bacharelado   |
| ALUNO 4              | Licenciatura  |
| ALUNO 5              | Licenciatura  |
| ALUNO 6              | Bacharelado   |
| ALUNO 7              | Licenciatura  |

Fonte: elaborada pelo autor.

A dinâmica da aplicação do módulo de ensino consistiu na leitura prévia do texto base pelos alunos, seguida da apresentação, discussão do texto com os mesmos, incluindo as atividades de avaliação, totalizando três encontros presenciais, com duração de 1h40min cada um, e um encontro com duração de 50min. Essa é, de modo geral, a rotina de desenvolvimento dos conteúdos dos cinco livros-texto da disciplina supracitados.

### 6.3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

A avaliação ocorreu durante toda a aplicação do módulo de ensino, sendo a coleta de dados realizada de três maneiras distintas: (1)

observação livre; (2) conjunto de questões; (3) entrevista semiestruturada.

Segundo Trivinõs (1987, p. 153), a observação livre não é simplesmente observar de forma neutra, mas busca destacar um conjunto de características.

Observar um “fenômeno social” significa, em primeiro lugar, que determinado evento social, simples ou complexo, tenha sido abstratamente separado de seu contexto para que, em sua dimensão singular, seja estudado em seus atos, atividades, significados, relações etc (TRIVINÕS, 1987, p. 153).

No escopo deste trabalho, a observação livre destina-se a descrever os encontros e os aspectos gerais das discussões conceituais e epistemológicas ocorridas durante a intervenção didática. Alguns questionamentos prévios orientaram a observação, tais como: (1) As discussões conceituais e epistemológicas apareceram espontaneamente ou precisaram ser provocadas? (2) Algum tema recebeu destaque nas discussões? (3) Qual foi o teor das discussões?<sup>48</sup>

Os dados foram registrados em áudio, e analisados durante e após o período de aplicação do módulo de ensino.

Para permitir uma avaliação mais individual, idiossincrática, foi proposto um conjunto de quatro questões, a serem respondidas pelos alunos individualmente por escrito. Não houve um processo de validação formal das questões, porém a sua elaboração contou com a análise de dois pesquisadores da área, que fizeram inúmeras sugestões para a melhor adequação aos objetivos da pesquisa. O ALUNO 3 não se dispôs a participar da entrevista. As perguntas e seus objetivos são descritos abaixo.

**Questão 1 (Q1)** - Durante o desenvolvimento da ciência, cientistas e filósofos se depararam com diversos problemas empíricos importantes, como: (1) Medida da circunferência da Terra, por Eratóstenes; (2) Refutação da Astrologia, por Santo Agostinho; (3) Determinação da longitude em alto mar, pelo método de Gemma; (4) Medida da velocidade da luz, por Roemer; (5) Cálculo das distâncias interplanetárias, por Cassini e Richer; entre outros. Em sua opinião:

48 Essa questão será explicada melhor no capítulo 7 (sete), quando será exposto o processo de categorização dos dados coletados.

**Q1a)** Seria possível a resolução destes problemas, através dos métodos adotados por estes personagens, sem que fizessem o uso de uma noção de simultaneidade? Exemplifique sua resposta comentando o papel que o conceito de simultaneidade desempenhou na resolução de, pelo menos, dois dos problemas citados no enunciado.

**Q1b)** Esses problemas empíricos foram relevantes na evolução histórica do conceito de simultaneidade? Contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste conceito? Justifique sua resposta.

**Objetivos:** O primeiro item busca indícios de ressignificação do conceito de simultaneidade averiguando se o aluno percebeu que os diversos problemas empíricos, citados na elaboração da questão, foram resolvidos por métodos que necessariamente se utilizavam de uma concepção de simultaneidade, mesmo que implícita. Por exemplo, no caso da medida da circunferência da Terra (Eratóstenes), a simultaneidade foi estabelecida por um método de sincronização de relógios (relógio solar). Esse método não poderia ser utilizado caso as cidades Alexandria e Siena não estivessem aproximadamente na mesma longitude. Na determinação da longitude em alto mar, pelo método de Gemma, era preciso sincronizar um relógio em um ponto de referência e carregá-lo em um barco, até alto mar. O relógio necessariamente precisaria permanecer sincronizado para o método funcionar, um problema tecnológico na época. Para conhecer a longitude em alto mar, bastaria verificar a diferença com a hora solar local, e assim conhecer a longitude.

O segundo item visa questionar e provocar uma reflexão sobre o papel dos problemas empíricos no desenvolvimento da ciência, no contexto do desenvolvimento do conceito de simultaneidade, que segundo a **visão problemática da ciência** (GIL-PEREZ *et al*, 2001) está bastante arraigada entre alunos e professores de ciência. Espera-se que o aluno esclareça sua posição particular, referente a esse ponto, com uma argumentação plausível e que use alguns dos exemplos do primeiro item desta questão para exemplificar sua resposta.

**Questão 2 (Q2)** - Pesquisas tem mostrado que muitos alunos e professores, tanto da Educação Básica quanto Superior, compreendem a ciência como uma atividade que se desenvolve essencialmente sem vínculos com outros aspectos da vida humana, por exemplo, relativos à economia, à política, à religião, à cultura, entre outros. A evolução do conceito de simultaneidade, apresentada no texto, corrobora ou enfraquece essa posição? Justifique.

**Objetivo:** A intenção desta pergunta é buscar compreender como o aluno relaciona ciência, tecnologia e sociedade, com base em dois episódios que se interrelacionam: as Grandes Navegações e o desenvolvimento dos relógios mecânicos. O método de Gemma, a atividade comercial e o desenvolvimento tecnológico formaram um intrincado contexto que ajuda a elucidar como a ciência não é desvinculada de outras atividades humanas, contrastando com a visão socialmente neutra da ciência.

**Questão 3 (Q3)** - O texto apresentado narrou o rico desenvolvimento histórico do conceito de simultaneidade, incluindo o período entre Newton e Einstein, em que diversos atores contribuíram significativamente, como Leibniz, Kant e Poincaré. Entretanto, os livros didáticos de física geral costumam dar destaque a esse conceito somente quando abordam a Relatividade Restrita. É comum que estes livros façam um contraste apenas entre a concepção newtoniana (absoluta) e a einsteniana (relativística) do conceito de simultaneidade. Em sua opinião, que possíveis benefícios a apresentação dos aspectos evolutivos do conceito de simultaneidade pode trazer para a compreensão da Relatividade Restrita?

**Objetivo:** A identificação e discussão de alguns episódios históricos que contribuem significativamente para o entendimento da Relatividade Restrita pode trazer à tona indícios de ressignificação<sup>49</sup> do conceito de simultaneidade, pois evidencia que houve interação entre os conhecimentos prévios do aluno sobre a simultaneidade (que são essencialmente dessincretizados e descontextualizados) com a evolução histórica deste conceito.

Dentre os episódios que podem ser citados, tem-se o princípio da antecedência da causa (Leibniz e Kant), que faz Einstein afirmar que a velocidade da luz no vácuo é a maior velocidade possível no universo, em 1907. Ou então, os questionamentos teóricos e filosóficos de Poincaré sobre a natureza do conceito de simultaneidade (é uma convenção?). Outra coisa que pode ser citada pelos alunos é a influência da definição operacional de simultaneidade de Poincaré e a que Einstein utilizou em 1905.

**Questão 4 (Q4)** - Diversos livros didáticos de ciências da Educação Básica argumentam que o conhecimento da ciência aumenta de forma cumulativa, linear e possui caráter definitivo<sup>50</sup>. O

---

49 Conforme discutido no item 4.1 desta dissertação.

50 A expressão caráter definitivo foi empregada no sentido de que o novo

desenvolvimento histórico do conceito de simultaneidade, exposto no módulo de ensino, corrobora com esta visão? Justifique sua resposta citando exemplos.

**Objetivo:** A evolução histórica do conceito de simultaneidade, apresentada no módulo de ensino, indica diversas concepções diferentes, e até mesmo opostas, do conceito de tempo e simultaneidade. Por exemplo, a concepção de Leibniz coloca o conceito de simultaneidade como mais primitivo que o de tempo, já Kant defende justamente o oposto. Ou então a concepção aristotélica de tempo, ligada ao movimento, que no decorrer da Idade Média evolui para uma concepção absoluta e desvinculada do movimento. Tem-se ainda o principal, o contraste entre a concepção newtoniana e a einsteniana de tempo e simultaneidade, discutida de forma contextualizada (ao contrário da abordagem dessincretizada e descontextualizada dos livros de física geral analisados). Essa questão busca incitar ao aluno a refletir sobre a **visão deformada acumulativa e linear** (GIL-PEREZ *et al*, 2001), já discutida no primeiro capítulo desta dissertação.

Além da observação livre e do conjunto de questões, foi utilizada uma terceira, e última, estratégia de coleta de dados: a entrevista semiestruturada. Este tipo de instrumento “valoriza a presença do investigador, oferece todas as perspectivas possíveis para que o informante alcance a liberdade e espontaneidade necessárias, enriquecendo a investigação” (TRIVINÕS, 1987, p. 146). Seu uso visa formar uma triangulação de dados, dando maior consistência e confiabilidade à análise dos mesmos, esclarecendo eventuais respostas e declarações feitas pelos alunos durante as discussões em sala de aula ou no conjunto de questões, que tenham sido nebulosas ou não compreendidas pelo investigador. Outro aspecto da entrevista é que, diferente das manifestações feitas durante a apresentação do módulo de ensino (aula), analisadas nas observações livres, na entrevista o aluno está em um ambiente de maior privacidade junto ao pesquisador, o que pode desinibi-los a manifestarem mais suas posições epistemológicas e conceituais.

As questões da entrevista semiestruturada foram divididas em dois tipos: (1) Duas questões gerais, para todos os alunos; (2) Questões específicas, elaboradas de forma individual a cada aluno, de acordo com a análise feita após a observação livre e aplicação do conjunto de

---

conhecimento não pode contradizer as teorias vigentes, ou seja, deve ser complementar (acumulativo) ao conhecimento estabelecido.

questões. Elas serão apresentadas de acordo com a necessidade na análise dos dados. As questões específicas serão apresentadas na análise das respostas, de acordo com a sua pertinência em esclarecer pontos nebulosos nas respostas dos alunos no questionário.

As questões gerais, e seus respectivos objetivos, são:

**Questão 5 (Q5)** - Na sua concepção, a apresentação do módulo de ensino aumentou seu conhecimento sobre o conceito de simultaneidade? Se sim, cite o episódio histórico que você considerou mais importante nesse processo.

**Questão 6 (Q6)** - Com relação ao aspecto histórico-filosófico. Qual episódio mais chamou sua atenção? Por que?

**Objetivos (Q5 e Q6):** No questionário, as perguntas foram direcionadas para aspectos conceituais e epistemológicos **específicos**, como a visão deformada **acumulativa e linear** (Q4), a visão deformada **apromatística** (Q1b), ou o benefício da evolução histórica do conceito de simultaneidade para o entendimento da simultaneidade einsteiniana (Q3). Mas o módulo de ensino apresenta episódios históricos em que outros aspectos conceituais podem chamar a atenção, assim como as visões deformadas que não foram contempladas nos objetivos do questionário. Portanto, as duas primeiras questões gerais da entrevista tem o objetivo de: (1) diversificar as discussões epistemológicas e conceituais; (2) proporcionar um feedback ao pesquisador sobre quais os melhores pontos explorados no módulo de ensino; (3) contribuir para a melhoria da módulo de ensino.

**Questão 7 (Q7)** – Existe algum ponto no módulo de ensino que foi de difícil compreensão? Se houve, qual foi? E qual a sugestão para mudá-lo?

**Objetivo:** Como comentado na Observação Livre, na apresentação do módulo de ensino ocorreram muitas dúvidas sobre as ideias contidas no texto base. Isso é um fator preocupante para atingir os objetivos da pesquisa, que pode resultar na má qualidade dos dados para análise da implementação do mesmo. Busca-se, nesse questionamento, que o aluno se posicione livremente sobre algum ponto que ele considere de difícil compreensão no módulo de ensino, permitindo ao pesquisador obter subsídios para a melhoria do mesmo.

Com base nessas três estratégias de coleta de dados, buscou-se reunir dados suficientes para avaliar a adequação do módulo de ensino,

com relação aos seus objetivos, buscando também subsídios que possibilitem sua adequação para aplicações futuras.





## 7 RESULTADOS E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS

Segundo Bardin (1977), as fases na Análise de Conteúdo podem ser sistematizados em três etapas:

1. Pré-análise: escolha e organização dos documentos, formulação de hipóteses e elaboração de indicadores para a interpretação;
2. Exploração do material: a delimitação e identificação de unidades de análise, codificação;
3. Tratamento dos resultados (categorização), inferência, a interpretação final.

A categorização dos dados pode ser feita de forma apriorística. Nesse tipo de processo existem elementos teóricos suficientes para propor a categorização dos dados de antemão. Ou seja,

É fornecido o sistema de categorias e repartem-se da melhor maneira possível os elementos, à medida que vão sendo encontrados. Este é o procedimento por "caixas", de que já falamos, aplicável no caso da organização do material decorrer diretamente dos **funcionamentos teóricos hipotéticos** (BARDIN, 1977, p. 119, grifo nosso).

Outra categorização é a não apriorística, onde as categorias surgem a partir da percepção do pesquisador sobre os elementos importantes que descrevem o fenômeno observado.

O sistema de categorias não é fornecido, antes resultando da classificação analógica e progressiva dos elementos. Este é o procedimento de "milhas". O título conceptual de cada categoria, somente é definido no final da operação (BARDIN, 1977, p. 119)

Foi a intenção do módulo de ensino, em consonância com os objetivos da pesquisa, direcionar o olhar epistemológico em torno das visões deformadas a ciência (GIL-PEREZ et al, 2001) e em discussões empíricas e teóricas sobre o conceito de simultaneidade. Portanto,

pondera-se que é uma hipótese justificada que as discussões geradas (declarações, opiniões, argumentações) estejam centradas nestes elementos. Nesse caso, a categorização proposta é do tipo *a priori*.

Tabela 9: Categorização *a priori* das unidades de análise.

| <b>Categorias</b>            | <b>Descrição</b>  | <b>Código</b> |
|------------------------------|---|---------------|
| Histórico/<br>Epistemológico | Comentários referentes às visões deformadas da ciência, à natureza de experimentos (mentais e empíricos), à natureza do conhecimento.   | HE            |
| Conceitual                   | Comentários referentes aos conceitos de simultaneidade e tempo, tanto no aspecto teórico quanto empírico, como: (1) formulação teórica do conceito de simultaneidade e tempo; (2) uso do conceito em um experimento mental; (3) definição operacional; (4) uso do conceito em um experimento empírico; (5) instrumentos de medição e tecnologia associados; (6) indícios de ressignificação deste conceito. | C             |

Fonte: elaborada pelo autor.

## 7.1 OBSERVAÇÃO LIVRE

### 7.1.1 O PRIMEIRO E SEGUNDO ENCONTROS

Para fomentar a participação dos alunos nas discussões conceituais e epistemológicas, e considerando que o período de aplicação da pesquisa foi no fim do semestre letivo de 2014.2, optou-se por dedicar o primeiro encontro (1h40min) para a leitura do texto base do módulo de ensino. Dessa forma, garante-se que ocorreu a leitura prévia do texto base, que é essencial para propiciar as discussões pretendidas. Foi realizada uma conversa inicial com os alunos, explicando resumidamente a pesquisa, seus objetivos e a importância da participação deles. O texto base foi entregue impresso aos alunos, que

iniciaram imediatamente a leitura. Neste encontro não houve qualquer discussão.

No segundo encontro, com duração de 1h40min, os tópicos apresentados foram do início do texto base (item 5.1) até o item 5.4 - Simultaneidade nas medições: um conceito subjacente. Durante os primeiros 18 minutos de exposição oral, onde foram abordadas as concepções de Parmênides e Aristóteles, nenhuma dúvida ou discussão ocorreu espontaneamente, ainda que sejam temas que possuam dificuldade filosófica para entendimento. Com base nesse comportamento, o pesquisador decidiu iniciar provocações em pontos-chave do texto, visando fomentar dúvidas, questionamentos e discussões. **Essa estratégia foi adotada durante todo o resto da exposição oral, inclusive nos encontros seguintes.**

Foi possível registrar 16 (dezesesseis) comentários, dos quais 12 (doze) (75%) foram obtidos mediante provocação, e outros 4 (quatro) (25%) espontaneamente. Durante este encontro, foram feitas, no total, 21 (vinte e uma) provocações, ou seja, apenas 57,2% das provocações resultaram em comentários relevantes. Com relação à natureza dos comentários, 12 (doze) (75%) foram conceituais, e 4 (quatro) (25%) epistemológicos.

A maioria dos comentários revelaram dúvidas no entendimento das ideias contidas no texto (principalmente as questões de ordem filosófica) ou foram afirmações sem acompanhamento de justificativa ou reflexão. A participação dos alunos foi, no geral, bastante tímida.

Dos comentários mais relevantes, a maioria foram realizados pelos ALUNOS 5 e 6. Por exemplo, sobre a teoria temporal do Gassendi:

[ALUNO 6] Parece isso, uma definição. A gente definiu o que significa tempo, porque antes a gente pode ficar aqui horas discutindo filosoficamente o que é tempo. Que nem você [o pesquisador] falou, se o mundo parasse, e a gente ficasse aqui 1 (uma) hora, todo mundo parado, ninguém se mexe, aí dá a sensação de que o tempo não passou. Mas se a gente definir tempo pela nossa noção do tempo, daí o tempo não passou, então não existe tempo. É uma definição. Aí parece que antes dele [Gassendi] estavam naquela "o tempo é, o tempo não é, o que que a gente define sobre o tempo?" É uma coisa muito

mais filosófica. Agora não, agora é tempo, o tempo passa, e o tempo é absoluto. O tempo é uma coisa independente. Acabou.

Em relação à refutação da Astrologia, o ALUNO 5 sugere como os caldeus poderiam melhorar seu método e resolver o problema apresentado na crítica feita por Sexto Empírico.

[ALUNO 5] Então se ele acendesse uma tocha [em vez do som do gongo] iria "estar de boa" [pois vale a simultaneidade visual aristotélica].

Apesar de ser um comentário curto, ele relaciona corretamente a concepção aristotélica ao episódio do Sexto Empírico, algo que não foi sugerido na elaboração do texto base nem na aplicação do módulo de ensino. É o primeiro indício observado de ressignificação do conceito de simultaneidade.

No episódio da medida da circunferência da Terra por Eratóstenes, os alunos não conseguiram identificar adequadamente qual a noção de simultaneidade implícita utilizada.

[ALUNO 5] Ele está medindo no mesmo horário (inaudível). [PESQUISADOR] É, no mesmo horário. Ele está usando o que para medir no mesmo horário? [ALUNO 5] O Sol [PESQUISADOR] Então na verdade é um relógio solar? [ALUNO 6] É, ele está usando a ideia de que o tempo passa igualmente em qualquer ponto. [ALUNO 5] A ideia de que ao meio-dia o Sol está à pino.

No texto base do módulo de ensino, é comentado qual é essa noção implícita:

A noção de simultaneidade implícita neste método é que dois eventos são simultâneos quando ocorrem no mesmo instante  $t$  de dois relógios (de sol) sincronizados (no mesmo meridiano).

Sobre as Grandes navegações e o desenvolvimento dos relógios,

houve surpresa acerca do desenvolvimento histórico dos relógios, abordado no tópico sobre o método de Gemma.

[ALUNO 6] Eu não sabia que tinha demorado tanto para fazerem um relógio com mais precisão. Nunca apareceu assim, isso. [PESQUISADOR] Instituíram prêmios na época, né? O rei da Espanha instituiu um prêmio, o da Inglaterra outro. Enfim, foi uma corrida. [ALUNO 6] Achei muito interessante, porque isso não aparece em nenhum livro, eu nunca tinha visto essa história do desenvolvimento dos relógios. Isso é extremamente importante. Eu não sabia que tinha toda essa odisséia. [PESQUISADOR] Odisséia de mais de um século. [ALUNO 6] E são coisas óbvias, que nem aquela coisa de levar o relógio no navio, é óbvio que aquilo lá vai funcionar. Sei lá, eu nunca pensei a respeito, de fato. É um problema real.

Os demais alunos também expressaram a mesma surpresa, pois também desconheciam o desenvolvimento tecnológico dos relógios mecânicos, que ocorreu principalmente após o século XV. Questionou-se se o desenvolvimento dos relógios teria ocorrido sem que interesses econômicos estivessem envolvidos.

[ALUNO 6] (risos). [ALUNO 5] Não. [PESQUISADOR] Não tem um ditado que diz que "a necessidade é a mãe da invenção? [ALUNO 6] É, tem a ver. [TURMA] (A maioria dos alunos restantes acenam com a cabeça, concordando).

Nos episódios restantes (medida da velocidade da luz por Roemer e cálculo das distâncias interplanetárias por Cassini e Richer) não ocorreram comentários relevantes, ainda que tivessem ocorrido 4 (quatro) provocações para discussão.

### 7.1.2 O TERCEIRO ENCONTRO

No terceiro encontro, após uma breve revisão dos temas tratados

no encontro anterior, iniciou-se a discussão do tópico 5.5 – Física Clássica: Newton e o tempo absoluto, até a definição de simultaneidade de Einstein de 1917, no item 5.7 – A simultaneidade na Relatividade Restrita. Não foi possível terminar a discussão do texto base, ficou faltando discutir o último assunto, que trata de Reichenbach e a tese da convencionalidade.

A baixa participação dos alunos nos dois primeiros encontros e o fato da maioria dos comentários relevantes terem sido realizados por apenas dois alunos foram considerados fatores importantes para guiar o andamento do terceiro encontro. Manteve-se a estratégia de realizar provocações, buscando direcioná-las aos outros alunos.

Ainda assim, a participação dos alunos foi menor. Das 17 provocações realizadas, 11 (onze) (65%) encontraram o silêncio, e somente 6 (seis) (35%) tentativas obtiveram êxito em obter alguma manifestação dos alunos. Todos os comentários relevantes foram de natureza conceitual.

Os alunos continuaram demonstrando muitas dúvidas em relação ao conteúdo do texto, e surpresa quando o pesquisador ressaltou que a teoria newtoniana aceita divergências nos intervalos de tempo medidos por dois relógios diferentes (tempo vulgar). Mas quando indagados se alguma outra teoria aceita uma divergência desse tipo, **não foi obtida resposta**. Um fato curioso, já que a relatividade do tempo é uma das questões mais impressionantes na Relatividade Restrita.

Para aumentar a participação dos alunos, o pesquisador realizou intensas provocações na exposição das ideias de Poincaré. Julga-se que isso é importante, pois são as ideias imediatamente anteriores à formulação da Relatividade Restrita, tendo Einstein recebido influência deste. Das 6 (seis) provocações realizadas, apenas uma resultou em resposta, mas insatisfatória para os propósitos desta pesquisa.

[PESQUISADOR] O que vocês acharam das ideias do Poincaré? [ALUNO 6] Acho que contribuiu bastante.

Sobre todas as concepções teóricas, entre Newton e Einstein, comentou-se que

[ALUNO 6] Então eu acho que teria que aparecer [as discussões] em filosofia, mas nem em filosofia isso aparece. [PESQUISADOR] Mas essa

discussão [teorias entre Newton e Einstein] aqui é... Mas não é Física isso aqui? [ALUNO 6] Sim, mas quando a gente fala em uma definição de tempo, é uma coisa bem filosófica, ainda mais pensando como eles pensavam na época, (inaudível) bem filosófica.

Já na relatividade, no tópico sobre a definição de simultaneidade, perguntou-se se a definição de Einstein de 1905 era equivalente à de Poincaré.

[ALUNO 7] Pra mim, parece que sim.  
[PESQUISADOR] Igual ela não é, mas ela significa a mesma coisa? [ALUNO 6] Sim.

Após esse comentário, por contraste, foi possível perceber que a maioria da turma acenou positivamente, concordando. A percepção da equivalência das definições operacionais de simultaneidade de Poincaré e Newton poderia indicar mais um indício de resignificação. Porém, como as respostas não foram elaboradas, os alunos podem ter respondido porque perceberam de alguma forma que essa é a resposta esperada pelo pesquisador ou por influência da resposta da maioria.

Na discussão sobre a relação entre causa e efeito e sinais supraluminais, os alunos foram provocados a responderem o que aconteceria se existissem sinais mais rápidos que a luz no vácuo. Apesar do silêncio dos alunos, o pesquisador insistiu para que eles retomassem o texto para responder a pergunta. Após quase 3 minutos, o ALUNO 6 respondeu corretamente: viola a causa e a consequência.

Como é necessário compreender bem este ponto, pois é subsídio para as discussões sobre a tese da convencionalidade de Reichenbach, o pesquisador decidiu, **sem preparo prévio**, explanar o assunto no quadro, dado que o texto base não aborda esse detalhe. Foram discutidos os conceitos de intervalo espaço-temporal, os tipos de intervalos (espacial, temporal e luminoso), e como sinais supraluminais podem violar a causalidade entre dois eventos separados por um intervalo espacial. Por último, foi abordada, com o auxílio de duas animações, a definição de simultaneidade de 1917. Os alunos comentaram que ela parece mais simples de entender do que a de 1905.

A estratégia de direcionar as provocações aos demais alunos não surtiu efeito neste encontro, pois os comentários mais relevantes foram

novamente realizados pelo ALUNO 6. A persistência na baixa participação geral foi um fato muito preocupante nesta etapa da pesquisa. Esses dois fatos resultaram na proposição de uma dinâmica do tipo “mesa redonda”, no próximo encontro, propiciando mais um momento de discussão e coleta de dados.

### 7.1.3 O QUARTO ENCONTRO

O quarto encontro não estava inicialmente programado, mas foi necessário realizá-lo porque a discussão sobre sinais supraluminais ocupou um tempo maior, não previsto, no segundo encontro. Na primeira metade do terceiro encontro, a tese da convencionalidade de Reichenbach é apresentada, e relacionada com a posição instrumentalista de Poincaré. Não houve manifestação espontânea dos alunos.

Na segunda metade do quarto encontro, para motivar a participação mais efetiva dos demais alunos, foi proposta uma dinâmica do tipo “mesa redonda”, em que todos se sentaram em círculo e cada um expôs sua opinião sobre a convencionalidade da simultaneidade.

O [ALUNO 5] não expôs sua opinião, mas solicitou novos esclarecimentos sobre as ideias de Poincaré e sua relação com a contribuição de Reichenbach, ainda que isso tivesse sido recém discutido, minutos antes. Os alunos demonstram muita dificuldade de entender a argumentação de Poincaré, citada na íntegra no texto base.

Quando um fenômeno nos aparece como a causa de outro, nós o vemos como anterior. É então pela causa que definimos o tempo; mas quase sempre, quando dois fatos nos parecem ligados por uma relação constante, como reconheceremos qual deles é a causa e qual é o efeito? Admitimos que o fato anterior, o antecedente, é a causa do outro, do consequente. É portanto pelo tempo que definimos a causa. Como ter uma saída para essa petição de princípio? POINCARÉ, 1995, p.34).

E também as consequências da convencionalidade da simultaneidade:

A simultaneidade de dois eventos, ou a ordem de



sua sucessão e a igualdade de duas durações, devem ser definidas de tal modo que o enunciado das leis naturais seja tão simples quanto possível. Em outros termos, todas essas regras, todas essas definições são apenas fruto de um oportunismo consciente (POINCARÉ, 1995, p.39)

Ou seja, para Poincaré não existem relações absolutas de causa e efeito, tudo depende das convenções (convenientes) que foram adotadas pela teoria. Apesar de todo o esforço de tornar isso claro aos alunos, nenhum comentário realizado sobre essa questão manifestou pleno entendimento do que estava em jogo (a regra metafísica da causa e efeito). Foi possível registrar somente 2 (dois) comentários que demonstraram alguma reflexão ou justificativa.

[ALUNO 1] Enquanto forem duas físicas distintas, a simultaneidade vai ter que ser escolhida. Agora, se por acaso alguém conseguir uma lei física que explique as duas com velocidades baixas ou altas, aí pode ser que a simultaneidade não tenha que ser escolhida. Vai ter um referencial.

Esse é exatamente o caso da Relatividade Restrita. Portanto, ainda que o aluno não pareça perceber de imediato, ele está tomando a simultaneidade einsteniana como sendo não arbitrária. O outro comentário foi

[ALUNO 6] Eu não sei, eu acho que assim, se for considerada uma convenção, é uma convenção óbvia. Sei lá, é baseado no nosso dia a dia. [PESQUISADOR] Por que seria óbvia? [ALUNO 6] Porque é baseada no nosso dia a dia, entendeu? Eu tô vendo o giz cair. Não é um negocio que eu imaginei o giz cair. [PESQUISADOR] Não, não, mas conceito de simultaneidade. Onde estaria a obviedade de fazer como o Einstein fez aqui, usar a luz? Quer dizer, Poincaré, usar a luz e tal. [ALUNO 6] Eu não sei, pra mim ainda a ideia do Leibniz ainda é muito lógica. Se duas coisas são causa e efeito uma da outra, elas não podem ser simultâneas. Ponto. Pra mim isso faz total sentido.

Nesse caso o aluno apresenta uma certa indecisão, ou talvez confusão, entre uma concepção intuitiva de simultaneidade, com uma concepção arbitrária (Leibniz).

Encerrada a discussão sobre a convencionalidade da simultaneidade, solicitou-se aos alunos, como última provocação, que comentassem livremente sobre os episódios históricos que mais chamaram sua atenção.

O [ALUNO 1] chama a atenção de que, em sua percepção, pouco se comenta sobre a atividade científica entre os anos de 900 até 1500, como se houvesse um salto histórico nesse período. O ALUNO 6 responde:

[ALUNO 6] Isso que dá a sensação errônea que de fato nesse período a ciência foi feita por gênios. Que é sempre o negocio do tempo e que os caras ficaram mil anos se questionando e veio um e pá, deu uma luz assim. Sempre me deu essa sensação... você olha as datas e pô, parece que o caras ficaram mil anos lá e não fizeram nada e que tem que vir um Einstein, um Newton pra dar um seguimento. Uma coisa que a gente tava tentando discutir aqui, **a disciplina inteirinha**, contra a ciência ser feita por gênios, ser feita pela pluralidade, que cada um tem uma contribuição e tal e aí a gente sempre chega nessa época e pô, que nem o [ALUNO 1] falou, que dá um salto. Aí dá essa sensação de que não, na verdade sempre teve que vir um que não, não poderia ter sido qualquer outro. Tem que ser ele.

Este comentário é bastante pertinente, pois como discutido anteriormente, a disciplina de Evolução dos Conceitos da Física apresenta a história da Física com ênfase na articulação da histórico-epistemológica. O ALUNO 6 relacionou as inúmeras contribuições de cientistas e filósofos, entre os anos de 900 até 1500, discutidas no módulo de ensino - questionando se a ciência é feita por gênios isolados - com discussões realizadas em momentos anteriores nesta disciplina. Complementando a discussão, o ALUNO 5 comentou:

Teve um na primeira aula, que você falou sobre, que teve produção ali na Idade Média, que não foi

só uma época das trevas e tal. Mas é que fico pensando que foram poucas pessoas que tiveram acesso, não é que nem na época do Einstein onde um grupo maior de pessoas tinha acesso ao conhecimento, mais cientistas pensando. Então a probabilidade de ter produção era muito maior, assim [ALUNO 5] .

Durante a dinâmica da “mesa redonda”, ocorreram um total de 7 (sete) manifestações, sendo 3 (três) (43%) de cunho epistemológico e 4 (quatro) (57%) conceituais. As discussões foram mais alongadas e produtivas, porém ainda manifestaram dificuldades do entendimento das ideias contidas no texto, ou foram manifestações em que não foi possível inferir exatamente o que os alunos estavam pensando.

#### 7.1.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A OBSERVAÇÃO LIVRE

É importante salientar que os dados registrados na etapa da Observação Livre ocorreram no primeiro momento em que eles estão refletindo sobre a longa história evolutiva do conceito de simultaneidade (aplicação do módulo de ensino). Essa pode ser uma das causas da baixa participação espontânea dos alunos e dos inúmeros comentários confusos e incompletos. A maior parte das intervenções dos alunos foi para sanar dúvidas referentes as ideias do texto. A presença tímida das intervenções opinativas dos alunos, tanto em quantidade quanto em qualidade, é o fator mais preocupante em relação aos objetivos nesta etapa da pesquisa. Isso resultou em somente um possível indício de resignificação do conceito de simultaneidade. Outra característica importante de ser mencionada é que as participações foram mais frequentes entre os ALUNOS 5 e 6, complementada pela participação em menor grau dos ALUNOS 1 e 7.

Os problemas empíricos obtiveram uma boa recepção, obtendo 5 (cinco) comentários relevantes, principalmente o caso do método de Gemma e os cronômetros marítimos. No âmbito teórico, os paradoxos de Zenão apresentados receberam 6 (seis) manifestações dos alunos, entretanto o paradoxo do Estádio parece não ter sido compreendido por todos.

Contudo, as maiores dificuldades de entendimento das ideias do texto residiram nas concepções teóricas de Leibniz, Kant e Poincaré. A pesquisa histórica evidenciou que existiram muitos outros cientistas e

filósofos no período pós Newton até a relatividade, tais como Locke, Berkeley e Mach. Ainda que tenha sido feita uma seleção cuidadosa de tópicos, evitando aprofundamentos desnecessários, foi notável a dificuldade de compreensão das ideias desses cientistas e filósofos. Diversas provocações (cinco) resultaram em silêncio da turma, além de inúmeras solicitações de esclarecimentos adicionais por parte dos alunos.

As dificuldades de entendimento das ideias contidas no texto também foram detectadas na aplicação de sondagem do módulo de ensino, realizada na mesma disciplina em um outro semestre. Entre a sondagem e a aplicação definitiva, o texto base sofreu diversas modificações, como: (1) supressão de alguns episódios históricos que pouco contribuíam para o entendimento do quadro geral do desenvolvimento da simultaneidade, mas que traziam ideias filosóficas de difícil compreensão ou que alongavam demasiadamente o texto; (2) reelaboração da exposição das ideias de alguns filósofos, como Leibniz e Poincaré, e que novamente se mostraram de difícil compreensão aos alunos.

Outro fator que pode ter contribuído na dificuldade de entendimento das ideias do texto, e consequentemente na baixa participação dos alunos, é uma das características inerentes do módulo de ensino: o recorte histórico longitudinal, que apresenta grande quantidade de episódios históricos e concepções teóricas. Pode não ter havido tempo didático e físico suficiente para que os questionamentos conceituais e epistemológicos aflorassem, como também indícios mais evidentes de ressignificação do conceito de simultaneidade.

A quantidade de episódios históricos e seu aprofundamento pode ser revisto em desdobramentos futuros dessa pesquisa, pois foi necessário o uso de um encontro extra de 45 minutos por causa das dificuldades de entendimento do princípio da antecendência da causa no contexto da Relatividade Restrita.

## 7.2 RESULTADOS E ANÁLISE DO CONJUNTO DE QUESTÕES E ENTREVISTA

O conjunto de questões proposto, além de atender aos objetivos da pesquisa, foi utilizado para avaliação na disciplina de Evolução. Os alunos receberam as questões no quarto, e último, encontro da aplicação do módulo de ensino, sendo elas apresentadas pelo pesquisador a fim de

dissipar eventuais dúvidas sobre os seus objetivos. Foi negociado um prazo de 10 dias para a entrega do material.

A análise das questões específicas da entrevista semiestruturada foram articuladas com a análise do conjunto de questões (Q1 até Q4), pois se interrelacionam, visto que foram elaboradas para esclarecer eventuais respostas nebulosas. As questões gerais da entrevista (Q5 até Q7), que foram respondidas por todos, são analisadas na sequência do questionário.

### 7.2.1 QUESTÃO 1a (Q1a)

Dentre os episódios históricos sugeridos nessa questão, os ALUNOS 2, 3, 4, 5 e 7 atingiram plenamente o objetivo proposto e identificaram e comentaram adequadamente concepção de simultaneidade implícita em dois episódios. Os ALUNOS 1 e 6, apesar de também citarem dois episódios, atingiram o objetivo parcialmente, com apenas um episódio justificado adequadamente. Os episódios mais citados – por aproximadamente metade dos alunos – foram a refutação da Astrologia, por Santo Agostinho, e a medida da circunferência da Terra, por Eratóstenes.

Diferente do que houve na Observação Livre, nesta questão foi possível obter indícios de ressignificação do conceito de simultaneidade<sup>51</sup>. Por exemplo:

Na medição feita por Eratóstenes, é utilizado o fato de que a hora solar de duas cidades no mesmo meridiano terrestre é a mesma. Sendo assim, dois relógios de sol, um em Siena e outro em Alexandria, estão sempre sincronizados. Essa ideia de dois relógios (de sol, nesse caso) marcarem a mesma hora no mesmo meridiano é basicamente a noção de simultaneidade de que dois eventos são simultâneos quando ocorrem em um mesmo instante de tempo de dois relógios sincronizados [ALUNO 7].

Durante o segundo encontro da apresentação do módulo de ensino, conforme já comentado na Observação Livre, os alunos não

---

51 Conforme a discussão sobre ressignificação feita no item 4.1 desta dissertação.

conseguiram identificar e discutir qual a concepção de simultaneidade implícita no episódio do Eratóstenes. Porém, no conjunto de questões, ela foi uma das mais citadas. A outra concepção mencionada – por apenas um dos alunos – foi o método de Gemma. Os demais episódios sugeridos não foram citados.

### 7.2.2 QUESTÃO 1b (Q1b)

Todos os alunos opinaram que os problemas empíricos são importantes para o desenvolvimento do conceito de simultaneidade, porém apenas os ALUNOS 1, 2 3, 4 e 7 (a maioria) justificaram apresentando ao menos um episódio histórico como exemplo. Os ALUNOS 5 e 6 responderam genericamente, sendo a resposta considerada insuficiente<sup>52</sup>.

O ALUNO 1 usou como exemplo o episódio da velocidade de luz (Roemer),

para que este conceito [simultaneidade] chegue aos dias atuais da forma que conhecemos é necessário que existam estes problemas empíricos, que conflitam com as teorias e geram o clima propício para a inovação de uma ideia, como por exemplo a medida da velocidade da luz por Roemer [ALUNO 1]

Questionado na entrevista a esclarecer esse trecho da resposta, o ALUNO 1 afirma que em sua opinião, de forma geral, os problemas empíricos geram inovação na ciência, ou seja, é uma característica da atividade científica. Também comentou que no episódio de Roemer deve-se “descartar a ideia de que existem gênios isolados que através de súbitos *insights* geram teorias revolucionárias”, pois a finitude da velocidade da luz vinha sendo questionada por “estudos anteriores como no caso em questão foram os estudos de Empédocles, Francis Bacon, Avicena e Galileu que serviram de base para as ideias de Roemer”. Não era esperado nos objetivos desta questão um comentário epistemológico desta natureza.

O ALUNO 2 comentou em sua resposta que os problemas empíricos são importantes, mas que uns problemas são mais importantes

---

52 Conforme discutido nos objetivos desta questão, no item 6.3 desta dissertação.

do que outros.

Na minha opinião, o grande passo no período considerado foi o fim da simultaneidade visual com o trabalho de Roemer/Bradley, que realmente foi um avanço na direcção certa e de grande importância. Os restantes problemas empíricos apresentados, na minha opinião, apesar de terem tido a importância de trazer o conceito de simultaneidade de algo meramente intuitivo para algo a ser discutido e definido mais concretamente [ALUNO 2].

O ALUNO 3 elaborou uma resposta bastante completa, citando inúmeros problemas empíricos abordados no texto base, onde se destaca uma observação ao episódio de Santo Agostinho.

Já Santo Agostinho, com seus mensageiros utiliza um conceito operacional de simultaneidade alternativo à simultaneidade visual, de maneira análoga ao que seria feito na relatividade restrita, contribuindo à diversidade conceitual e ampliando as noções sobre simultaneidade [ALUNO 3].

Durante a fase de exposição oral do módulo de ensino, nenhum aluno comentou sobre a importância dos problemas ou do carácter problemático da ciência. Entretanto, como ilustrado nas citações acima, as discussões sobre esse ponto específico ocorreram com êxito no questionário.

### 7.2.3 QUESTÃO 2 (Q2)

Foi unanimidade entre os alunos de que o conteúdo do texto base enfraquece a visão de que a ciência se desenvolve desvinculada das outras atividades humanas. Todos os alunos justificaram adequadamente suas respostas, e apenas o ALUNO 7 não citou as Grandes Navegações, método de Gemma e o desenvolvimento dos relógios. Os ALUNOS 4 e 7 citaram também o aspecto cultural da Astrologia.

Como exemplo de aspecto cultural, pode-se citar

Sexto Empírico e a refutação da Astrologia. Os astrólogos necessitavam conhecer o signo ascendente para determinar o horóscopo, que é indicado pela constelação que está nascendo no céu (no leste), no momento em que o bebê vem ao mundo, sendo necessário determinar a simultaneidade não local de dois eventos [ALUNO 4].

O trabalho científico, assim como a elaboração de conceitos, é, em grande parte, relacionado às concepções, sejam elas filosóficas, religiosas, éticas, políticas, enfim, culturais, que o cientista ou pensador evidentemente possa ter. Podemos perceber tais vínculos operando, por exemplo, nos argumentos de Sexto Empírico, que se opôs fortemente à Astrologia, em uma época em que essa estava ganhando muitos adeptos [...] Na sequência, ainda na linha da tentativa de refutação da Astrologia, é possível perceber também vínculos culturais e econômicos no método de Santo Agostinho, ao observar que, embora tenham nascido no mesmo instante, o filho de uma senhora viveu na riqueza, enquanto que o filho de uma escrava teve o mesmo destino da mãe [ALUNO 7].

O reconhecimento dos episódios envolvendo a Astrologia no contexto da discussão sobre a visão socialmente neutra da ciência foi uma surpresa bastante agradável, pois a elaboração do texto base do módulo de ensino focou-se no episódio das Grandes Navegações.

#### 7.2.4 ANÁLISE DA QUESTÃO 3 (Q3)

Essa foi a questão com o menor índice de êxito do questionário. Os ALUNOS 3 e 5 responderam conforme as expectativas discutidas nos objetivos desta questão, e citaram ao menos uma contribuição específica abordada no módulo de ensino que poderia contribuir para a compreensão da Relatividade Restrita.

Assim, quando estudamos os conceitos de



relatividade restrita de Einstein, eles se tornam mais claros, pois já sabemos que não vale a simultaneidade visual - que o leitor poderia intuir - conhecemos a justificativa para a velocidade da luz não ser infinita, temos clara a evolução nos conceitos de causa e efeito, e da arbitrariedade na definição de simultaneidade, como afirma Poincaré, bem como a história dos relógios que tem íntima relação com os conceitos de tempo. Munidos desses conceitos, de seus pressupostos teóricos e se sua contextualização, tais quais foram expostos no texto, podemos nos aproximar dos problemas iniciais de Einstein e ver seu salto teórico de forma muito mais simples e transparente [ALUNO 3].

Já os ALUNOS 2 e 4 citaram cientistas, mas não foram específicos sobre quais seriam suas contribuições. Retomando o assunto através da entrevista semiestruturada, apenas o ALUNO 2 foi capaz de esclarecer sua resposta.

Na minha opinião, e de um ponto de vista didático, o período entre Newton e Einstein tem uma figura de destaque cujo estudo é realmente útil, Poincaré [...] À primeira vista, simultaneidade parece algo que nem merece estudo por ser tão óbvio e intuitivo mas o estudo de Poincaré rapidamente desfaz essa ideia [ALUNO 2].

Na entrevista o ALUNO 2 comenta que Poincaré nos mostra que usamos “uma multidão de pequenas regras aplicáveis a cada caso”, dependendo da situação, e que não existe uma concepção geral de simultaneidade, e que isso abre questionamentos para que se rediscuta esse conceito na Relatividade Restrita.

O ALUNO 4 explicitou que o princípio da antecendência da causa foi importante para que Einstein tomasse a velocidade da luz no vácuo como a maior velocidade possível no universo, e que isso é relevante para o entendimento da Relatividade Restrita.

Os demais, ALUNOS 1, 5 e 7, afirmaram que existem benefícios para o entendimento da Relatividade Restrita, mas não mencionaram

uma contribuição específica, de forma que suas respostas foram consideradas insuficientes para os objetivos desta pesquisa.

O ALUNO 6 comentou que acompanhar a evolução histórica das ideias traz “conforto filosófico”, pois quando o estudante (hoje) se depara com dificuldades para entender os conceitos físicos, é reconfortante saber que é porque não são coisas triviais. Que na verdade, muitos outros cientistas também tiveram a mesma dificuldade durante o processo histórico de evolução das ideias na ciência.

O ALUNO 1 expôs que o entendimento histórico de como Einstein chegou ao conceito de simultaneidade na Relatividade Restrita vai contra a noção

de que existem gênios isolados que criam, a partir de um estado, teorias revolucionárias. Desta maneira, mostramos que a ciência cresce com a cooperação de muitos, assim também motivamos estudantes de que não é necessário ser um gênio isolado [ALUNO 1].

Resumindo, apenas pouco mais da metade dos alunos apresentaram indícios de ressignificação do conceito de simultaneidade<sup>53</sup>, sendo que metade desse índice foi obtido com os esclarecimentos adicionais das entrevistas realizadas. O restante das repostas não apresentaram indícios de ressignificação.

Apesar de ter sido observado no terceiro encontro que todos os alunos concordaram que a definição operacional de simultaneidade de Poincaré é equivalente à de Einstein, no artigo original de 1905, esse fato não foi mencionado. Essa é uma contribuição específica que poderia ter sido levantada pelos alunos.

#### 7.2.5 QUESTÃO 4 (Q4)

Os ALUNOS 2, 3, 4, 5, 6 e 7 argumentaram que o módulo de ensino apresentado não corrobora com uma evolução do conhecimento científico de forma acumulativa, linear e de caráter definitivo. Os exemplos mais citados são relativos ao período histórico entre Newton e Einstein.

---

53 Conforme discutido no item 4.1 desta dissertação.

A noção de que o conhecimento científico evolui de forma linear e cumulativa é demasiado simplista. Este módulo enfraquece essa visão, pois além de contextualizar os problemas, expõe opiniões divergentes e concorrentes sobre a simultaneidade. O texto quebra com a linearidade da evolução dos conceitos de simultaneidade [ALUNO 3].

Para Newton, o conceito de tempo é mais fundamental do que o de simultaneidade. E, como o tempo, para ele, é absoluto, a simultaneidade também o é. Leibniz, contrariando as ideias de Newton, criou uma teoria sobre o tempo aonde o conceito de simultaneidade é mais primitivo que o conceito de tempo. Depois, novamente Kant rejeita a simultaneidade como antítese da sucessão e retoma a prioridade do tempo sobre o conceito de simultaneidade, assim como Newton, reafirmando assim as características não lineares para este conceito [ALUNO 7].

O ALUNO 1 expressou opinião peculiar e que merece atenção.

O desenvolvimento histórico do conceito de simultaneidade comprova a argumentação de diversos livros didáticos de Ciências da Educação Básica. E nesse texto é possível analisar que no progresso do conceito de simultaneidade não houveram saltos de ideias, assim como a ciência não possui um caráter definitivo, ou seja, não existe uma verdade absoluta na ciência [...] No decorrer dos anos desde a.C até século XX a construção de simultaneidade foi sendo construída aos poucos, tendo participação importante de diversos filósofos, o conhecimento foi sendo acumulado, e melhorado. Durante todo esse período houve um caráter definitivo sobre simultaneidade [ALUNO 1].

E justificou sua resposta citando a semelhança entre a definição operacional de Santo Agostinho (no episódio da refutação da Astrologia)

com a definição do ponto médio de Einstein, em 1917.

A resposta é notoriamente contraditória no que se refere à expressão “caráter definitivo” e não deixa claro qual é a posição epistemológica do aluno. Na entrevista semiestruturada, solicitou-se que o aluno reelaborasse sua resposta, conforme o diálogo a seguir:

**[PESQUISADOR]** Podes ler novamente a pergunta. Se você não concordar contigo mesmo agora não tem problema. Podes mudar de opinião. Podes dar uma nova resposta.

**[ALUNO 1]** É que estou me pegando (sic) um pouco no caráter definitivo. O conceito muda de forma acumulativa e linear. Agora o caráter definitivo, agora no momento, soa muito forte em afirmar que é definitivo. Se é definitivo é uma coisa concreta, que não vai mudar.

**[PESQUISADOR]** A acumulação linear é que a pessoa nunca pode desdizer o que já foi dito. Ela só pode acumular mais conhecimento.

**[ALUNO 1]** Eu interpretei de forma diferente.

**[PESQUISADOR]** Como você interpretou?

**[ALUNO 1]** Que o conhecimento não possui saltos. Ele vai sempre aumentando, mas não possui saltos.

**[PESQUISADOR]** Entendi. E no que foi visto no Módulo de Ensino, ele corrobora essa visão ou não? Diz o contrário? Tem elementos pra dizer o contrário?

**[ALUNO 1]** O teu texto tem argumentos que mostram a forma cumulativa e linear, mas o caráter definitivo não.

**[PESQUISADOR]** Não tem o caráter definitivo então?

**[ALUNO 1]** É que quando você tem uma teoria e essa teoria é refutada houve uma perda do caráter definitivo dessa teoria.

**[PESQUISADOR]** Então o seu problema é com o caráter

definitivo?

[ALUNO 1] Isso.

[PESQUISADOR] Mas o caráter cumulativo e linear está ok (sic) ?

[ALUNO 1] Isso.

Divergindo dos demais alunos da turma, o ALUNO 1 afirma que o módulo de ensino reforça a opinião de que o conhecimento se acumula linearmente. Mas não só isso chama a atenção, e sim como o aluno interpretou a expressão “caráter definitivo” na quarta questão (Q4). A interpretação deste aluno é bastante plausível, sendo que esta pergunta introduziu ruído no processo de coleta de dados, indicando que em uma futura aplicação do módulo de ensino esta questão deva ser reelaborada.

#### 7.2.6 QUESTÃO 5 (Q5)

Quase todos os alunos relataram que o módulo de ensino aumentou, de alguma forma, o seu conhecimento sobre o conceito de simultaneidade. Os episódios mais citados foram o princípio da antecendência da causa e o método de Santo Agostinho.

Na minha opinião contribuiu sim. Eu fiquei chocado com a justificativa da causa e efeito da simultaneidade. Aquilo pra mim foi o be-a-bá [...] Aquele exemplo que você deu no quadro, que o princípio da luz viola a causa e efeito, foi algo que eu gostei bastante [...] Porque embora seja simples, você não para pra pensar. Isso me ajudou a entender o surgimento de uma corrente, campo. Pensar que essas coisas não são necessariamente simultâneas, um causa o outro [ALUNO 1]

Apenas o ALUNO 7 relatou que não percebeu um aumento em seu conhecimento sobre o conceito de simultaneidade, apenas que “não sabia muito do seu histórico, que é complexo, menos intuitivo”. Esta afirmação é curiosa, visto que este aluno respondeu a Q1b

adequadamente, ou seja, que tenha ocorrido indício de ressignificação conceitual.

Mas a resposta que mais chamou a atenção foi:

O questionário já abriu mais meus olhos por ter o conteúdo do texto. O questionário em si mostra que o texto é muito rico. Por exemplo, esse questionamento sobre Santo Agostinho, os aspectos culturais e socioeconômicos, você dá muito mais valor quando é abordado no questionário. Lendo o texto meio que passa batido. Pensei que era um texto comum, depois fui vendo como era rico, coisas que não sabia [ALUNO 4].

A menção da importância do questionário para o entendimento do texto será retomada nas considerações sobre o conjunto de questões e a entrevista, no item 7.3 desta dissertação.

#### 7.2.7 QUESTÃO 6 (Q6)

Os aspectos histórico-filosóficos mais citados (duas vezes cada) foram: (1) o desenvolvimento dos relógios e a questão da ciência socialmente neutra; (2) a teoria de Leibniz e a questão da prioridade ontológica entre simultaneidade e tempo. A menção ao primeiro item é consistente com a resposta da Q2, em que quase todos os alunos citaram as Grandes Navegações e o desenvolvimento dos relógios. Já o segundo item é uma surpresa, visto que durante a aplicação do módulo de ensino, ocorreram dúvidas quanto a teoria de Leibniz, mas nenhum comentário opinativo foi feito.

#### 7.2.8 QUESTÃO 7 (Q7)

Como comentado na Observação Livre, a maior parte das intervenções dos alunos durante a exposição oral do módulo de ensino, foi referente a dúvidas das ideias contidas no texto base. Apesar disso, quase todos os alunos relatam que não houve um episódio específico de maior dificuldade de entendimento. Apenas o ALUNO 6 afirmou que teve que reler diversas vezes o tópico das Grandes Navegações e o

desenvolvimento dos relógios, mas que “estava tudo muito bem explicado”. O que explica essa aparente contradição?

### 7.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O QUESTIONÁRIO E A ENTREVISTA

No conjunto de questões (Q1 até Q4), dois terços das respostas se enquadraram nos objetivos propostos para as questões. Esse índice contrasta bastante com os dados coletados na Observação Livre, em que ocorreram muito poucas manifestações opinativas dos estudantes. Na entrevista semiestruturada os alunos também forneceram, quase na totalidade, respostas curtas e diretas. Quais os motivos de tamanha discrepância?

Inúmeros fatores podem contribuir para essas situação: (1) característica de pouca participação em aula da turma, timidez generalizada; (2) falta de leitura prévia do texto; (3) falta de tempo didático e físico para que os alunos realizem uma reflexão elaborada das ideias contidas no texto; (4) contribuição relevante do questionário para o entendimento e amadurecimento do conteúdo.

Com relação a primeira hipótese, seria necessário que o pesquisador acompanhasse toda a disciplina para que fosse possível formar juízo razoável. A segunda hipótese foi minimizada porque o primeiro encontro foi dedicado a leitura prévia do texto. Já a terceira e quarta hipóteses são complementares, e parecem mais prováveis à luz do comentário do ALUNO 4 na Q5.

Diferente do que ocorre no contexto das provocações do pesquisador durante a exposição oral do módulo de ensino, no conjunto de questões os alunos podem reler os trechos do texto que tiverem dificuldade, responder as questões respeitando o seu tempo próprio e trocar informações com seus colegas. Para obter maior participação oral dos estudantes, é razoável considerar, em uma próxima aplicação deste módulo de ensino, o uso de uma dinâmica de discussão/debate após o conjunto de questões, ou mesmo articular o texto a um guia de estudos.

A entrevista semiestruturada foi realizada após a aplicação do conjunto de questões. Se o questionário auxiliou os alunos a compreender melhor as ideias contidas no texto base, conforme comentário do ALUNO 4 na Q5, então é plausível que os alunos não identifiquem (não se lembrem) as dificuldades de entendimento do

texto, observadas pelo pesquisador na Observação Livre, no momento em que concedem a entrevista. Essa hipótese explicaria a contradição apontada nas respostas da Q7. Porém a Q7 é uma pergunta fundamental no mecanismo de *feedback* para a melhoria do texto base, o que ocasiona a perda de uma oportunidade muito importante na coleta de dados.

Outro ponto importante de salientar é que os indícios de ressignificação levantados no conjunto de questões não podem ser tomados como evidências de aprendizagem significativa, visto que não é objetivo deste trabalho avaliar aprendizagem. Seria necessário avaliar o conhecimento de cada aluno antes da aplicação do módulo de ensino, o que tornaria a pesquisa demasiadamente complexa no contexto da presente dissertação.

A aplicação e a avaliação do módulo de ensino mostrou-se suficiente para produzir resultados iniciais relevantes como subsídios para uma possível continuidade da pesquisa. A quase inexistente participação opinativa dos alunos durante a exposição oral, mesmo limitando a coleta de dados sinaliza cuidados relevantes quanto ao indispensável tempo para a assimilação dos conteúdos.

O alto índice de respostas satisfatórias no conjunto de questões reforça empiricamente as potencialidades para discussões conceituais e epistemológicas levantadas no segundo e terceiro capítulos da dissertação, levando em conta que foi feito um recorte e seleção de episódios históricos para a construção da narrativa histórica do texto base.

As respostas insuficientes nas questões gerais da entrevista semiestruturada causam uma perda de dados considerável, do qual é muito difícil de estimar o custo de oportunidade. Mas o uso deste instrumento para lançar esclarecimentos nas questões nebulosas do conjunto de questões foi fundamental para determinar o êxito em algumas ocasiões.

A triangulação do conjunto de questões com a Observação Livre e a entrevista semiestruturada, mesmo com as limitações apontadas, foram fundamentais para estabelecer um quadro descritivo geral consistente na aplicação do módulo e seu impacto na amostra de alunos.



## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tema histórico deste trabalho demonstrou, desde o início, ser um grande desafio para o desenvolvimento da pesquisa. A revisão bibliográfica constatou a deficiência de estudos históricos que abordassem esse tema específico, o que levou ao uso de uma obra (Jammer, 2006) como referência principal, com os devidos cuidados que isso representa. No âmbito da HFC aplicada ao ensino, não foi encontrado um único trabalho, tanto em um nível nacional quanto internacional, que abordasse o conceito de simultaneidade como objeto principal. Nesse sentido, a temática desse trabalho possui os méritos e defeitos da originalidade.

A revisão sistemática realizada no primeiro capítulo indicou relativa escassez na quantidade de trabalhos empíricos em HFC no contexto nacional, e essa foi a preocupação determinante para que se optasse por uma pesquisa que englobasse uma parte empírica (aplicação). Em relação ao ensino, os fenômenos educacionais mais importantes da educação formal ocorrem dentro da sala de aula. A perspectiva da prática docente reflexiva implica no uso da sala de aula como um laboratório de inovação, tal qual ocorreu nesta pesquisa.

A pesquisa histórica identificou episódios históricos com potencial para discussões conceituais e epistemológicas em quantidade mais do que suficiente para a produção do módulo de ensino, o que permitiu uma seleção cuidadosa considerando os critérios didáticos descritos no item 4.2 desta dissertação.

No processo de elaboração do módulo de ensino, sobretudo o texto base, a articulação da pesquisa histórica com a análise dos livros didáticos de física geral, fundamentada na Teoria da Transposição Didática de Chevallard (1991), foi importante na seleção dos melhores episódios históricos para as discussões conceituais. A concepção implícita da simultaneidade desses livros possui paralelos históricos, como o episódio da medida da circunferência da Terra, por Eratóstenes, e que são fundamentais para induzir o processo de ressignificação conceitual.

Em um quadro mais amplo, a crítica justificada aos conceitos apresentados nas obras de física geral, usadas de forma recorrente nos cursos de ciências naturais e engenharias no mundo todo, são importantes para gerar insatisfação e consequente melhorias no ensino universitário.

Outro desafio foi o fato de que não existe um *how to*, uma

metodologia pronta para didatizar um conhecimento histórico-filosófico visando a aplicação no contexto do ensino de ciências. Concordando com as críticas de Caillot (1996) à extensão do conceito de Transposição Didática para outras áreas do saber, o desafio imposto ao pesquisador neste trabalho foi contribuir no cenário da pesquisa em ensino de ciências para a construção de novas práticas sociais de referência (que ainda não estão estabelecidas, é claro). O que existe é um conjunto esparso de orientações e sugestões didáticas, oriundas tanto de trabalhos teóricos quanto de outras pesquisas empíricas, no qual o pesquisador reuniu as que julgou mais pertinentes para atingir os objetivos da pesquisa.

Apesar das dificuldades inerentes do tema e as acima mencionadas, foi possível construir um módulo de ensino potencialmente significativo, conforme Ausubel (2003), e que proporcionasse/instigasse inúmeras discussões conceituais e epistemológicas, tal como os dados do conjunto de questões mostrou.

Ao recém formado em um curso de Licenciatura em Física, em que empírico é sinônimo de seguir roteiros e métodos estatísticos pré-estabelecidos em um laboratório de Física, a aplicação de uma pesquisa empírica no âmbito da educação foi certamente o maior desafio encontrado. Para lidar com as armadilhas da subjetividade na interpretação dos fenômenos e dados encontrados foi preciso a orientação e vigilância que somente um outro pesquisador experiente pode fornecer.

Segundo Greca (2002), muitas pesquisas em ensino de ciências no Brasil possuem dois grandes problemas: (1) a falta de determinação da metodologia utilizada, ou a citação de uma metodologia que não corresponde ao efetivamente utilizado na análise dos dados; (2) a ausência de relação entre o referencial (teórico) a partir do qual são formuladas as perguntas da pesquisa e a metodologia (e seus instrumentos de coleta de dados) utilizados. Neste trabalho, no aspecto metodológico, buscou-se explicitar todos esses aspectos, a fim de produzir uma pesquisa que possa contribuir com credibilidade aceitável para o debate acadêmico.

Com relação à parte empírica da pesquisa, existem prós e contras. Dentre os problemas, pode-se citar (1) uma única aplicação (descontada a sondagem inicial), que inviabiliza a generalização empírica; (2) o pequeno número da amostra; (3) a preponderância de dados úteis de uma única fonte (conjunto de questões); (4) muitas questões em aberto pontuadas na análise do questionário e entrevista, no item 7.3 desta

dissertação.

Do lado das boas notícias, o conjunto de questões obteve boa qualidade de dados e permitiu que muitas das discussões epistemológicas e conceituais que foram instigadas no texto base pudessem acontecer. Analisando o quadro geral da pesquisa, o módulo de ensino mostrou-se promissor, porém passível de modificações, substanciadas por mais aplicações empíricas, antes de ganhar vida própria em uma publicação. Em termos gerais, a avaliação atingiu parcialmente seu objetivo, porém os dados levantados foram suficientes para permitir analisar o módulo de ensino e sua aplicação, mas alguém do que o pesquisador ansiava.

Das possibilidades que se abrem para a continuidade da pesquisa, citam-se quatro: (1) a aplicação do módulo de ensino em outros contextos, como em outras turmas da disciplina de Evolução dos Conceitos da Física, disciplinas de história da Física em outras universidades e disciplinas de introdução à relatividade; (2) a incorporação de outros conceitos fundamentais na produção de um módulo de ensino complementar, como a noção de espaço ou força, que também possuem obras inteiramente dedicada a este tema escrita por Max Jammer; (3) a complementação deste módulo de ensino com a abordagem Termodinâmica e Mecânica Quântica na evolução histórica do conceito de simultaneidade; (4) a extensão da análise de livros de física geral, realizada no capítulo três, para livros específicos de ensino de Relatividade Restrita.

As discussões conceituais promovidas pelo módulo de ensino lançam mais dados no debate acadêmico sobre a questão da possibilidade e pertinência do uso da HFC não apenas para fins epistemológicos, mas para a aprendizagem de Física, como por exemplo fizeram Peduzzi e Peduzzi (2009b e 2010c) em dois livros de física básica que abordam a cinemática e Mecânica Newtoniana, produzidos para o curso de Licenciatura em Física modalidade de Ensino à Distância da Universidade Federal de Santa Catarina.

As habilidades e competências de um bom pesquisador são desenvolvidas através de um longo processo de dedicação, autocrítica e colaboração com seus pares. É como diz o ditado: ninguém nasceu sabendo (e a vida é curta). Nesse caso, esse trabalho é análogo ao primeiro passo, a primeira palavra, o primeiro desenho, o primeiro gol.

Considerando o desenvolvimento teórico na presente pesquisa, no qual se procurou examinar com minúcia a abordagem do conceito de simultaneidade em livros de física geral utilizados no ensino de Física

universitário, e as potencialidades histórico-epistemológicas na evolução deste conceito, espera-se que mais pesquisadores se motivem para contribuir com outros trabalhos neste tema.

**A história da ciência é também a história da humanidade.**

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABD-EL-KHALICK, F.; LEDERMAN, N. The influence of history of science courses on students' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 37, n. 10, p. 1057–1095, 2000.
- ACEVEDO, J. A. *et al.* Mitos da Didática das Ciências acerca dos motivos para incluir a Natureza da Ciência no Ensino de Ciências. *Ciência & Educação*, v. 11, n. 2, p. 1–15, 2005.
- AGOSTINHO. Confissões. São Paulo: Mundo Cristão, 2013.
- ALEMAÑ BERENGUER, R. A. Errores comunes sobre Relatividad entre profesores de enseñanza secundaria. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 15, n. 3, p. 301–307, 1997.
- ALLCHIN, D. Pseudohistory and Pseudoscience. *Science & Education*, v. 13, p. 179–195, 2004.
- ALONSO, M.; FINN, E. Física: um curso universitário. Addison Wesley, São Paulo, 1972.
- ALVES-FILHO, J. P. Atividades experimentais: do método à prática construtivista. Tese (Doutorado), Florianópolis, 2000.
- ARAUJO, W. D. A gênese do pensamento galileano. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2008. ISBN 9788578610043.
- ARISTÓTELES. A Física. [S.l.: s.n.]. 239 b.
- ARISTÓTELES. A Física. [S.l.: s.n.]. 218a 26-28.
- ARRIASSECQ, I.; GRECA, I. M. Algunas Consideraciones Históricas, Epistemológicas y Didácticas para el abordaje de la Teoría de la Relatividad Especial en el Nivel Medio y Polimodal. *Ciência & Educação*, v. 8, n. 1, p. 55–69, 2002.
- ARRIASSECQ, I.; GRECA, I. M. Enseñanza de la Teoría de la Relatividad especial en el Ciclo Polimodal: Dificultades Manifestadas por los Docentes y Textos de Uso Habitual. *Memorias de REF XIII*, 2003.
- ARRIASSECQ, I.; GRECA, I. M. Approaches to the Teaching of Special Relativity Theory in High School and University Textbook of Argentina. *Science & Education*, v. 16, n. 1, p. 65–86, jan 2007.
- ARRIASSECQ, I.; GRECA, I. M. A Teaching-Learning Sequence for the Special Relativity Theory at High School Level Historically and Epistemologically Contextualized. *Science & Education*, p. 1–25, 2010.
- ASSIS, A. K. T. Arquimedes, o centro de gravidade e a lei da

alavanca. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011. ISBN 9788578611057.

AUDIGIER, F.; CRÉMIEUX, C.; TUTIAUX-GUILLON, N. La place des savoirs scientifique dans les didactiques de la histoire et de géographie. . Revue Française de Pédagogie, n. 106, p. 11–23, 1994.

AURINO DA SILVA, Diego S.; Peduzzi, Luiz O. Q. O período de desenvolvimento da física newtoniana como contraponto às concepções e opiniões problemáticas a respeito do fazer e do conhecimento científicos. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, n. 2012.

AUSUBEL, D. P. Aquisição e Retenção de Conhecimentos: Uma Perspectiva Cognitiva. 1. ed. Lisboa: Plátano Edições Técnicas, 2003. Tradução portuguesa de Lígia Teopisto. ISBN 972-707-364-6.

AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J.; HANESIAN, H. Educational psychology: a cognitive view. 2. ed. New York: Holt Rinehart and Winston, 1978.

BACHELARD, G. A formação do espírito científico: Contribuição para uma psicanálise do conhecimento. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996. 18 p.

BARDIN, Laurence. Análise de Conteúdo. Lisboa: Edições 70, 1977 .

BELTRAN, M. H. R.; GOLDFARB, A. M. A. Escrevendo a história da Ciência. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005. ISBN 8528303101.

BELTRAN, M. H. R. *et al.* História da Ciência e Ensino. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2009. ISBN 9788578610326.

BELTRAN, M. H. R.; SAITO, F.; TRINDADE, L. d. S. P. História da Ciência: tópicos atuais. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011. ISBN 9788578610951.

BENKIRANE, R. A complexidade, vertigens e promessas. 1. ed. Porto Alegre: Instituto Piaget, 2004. ISBN 9789727717194.

BIEZUNSKI. História da Física Moderna. 1. ed. Porto Alegre: Instituto Piaget, 1993. ISBN 9728407998.

BRAGA, M.; GUERRA, A.; REIS, J. C. Convergência de saberes (idade média). Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2003. 101 p. ( Breve História da Ciência Moderna, v. 1). ISBN 8571107351.72

BRAGA, M.; GUERRA, A.; REIS, J. C. Das Luzes ao sonho do doutor Frankenstein (séc.XVIII). Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2005. 164 p. ( Breve história da Ciência moderna , v. 3). ISBN 8571108676.

BRAGA, M.; GUERRA, A.; REIS, J. C. A belle-époque da Ciência. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2007. 188 p. (Breve História da

Ciência Moderna, v. 4). ISBN 9788537800508.

BRAGA, M.; GUERRA, A.; REIS, J. C. Das máquinas do mundo ao universo-máquina (séc. XV a XVII). 2. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2008. 135 p. (Breve História da Ciência Moderna , v. 2). ISBN 8571107815.

BRENNAN, R. Gigantes da Física: uma história da Física moderna através de 8 biografias. 1. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998. ISBN 8571104484.

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, n. 1, 2011.

BRIDGMAN, P. W. The Logic of Modern Physics. New York: MacMillan, 1927.

BRITO, A. J.; NEVES, L. S.; MARTINS, A. F. P. A História da Ciência e da Matemática na formação de professores. In: NUÑEZ, I.; RAMALHO, B. (Ed.). Fundamentos do ensino-aprendizagem das Ciências naturais e da matemática: o novo ensino médio. Porto Alegre: Sulina, 2004. p. 284–296.

BUNGE, M. Filosofía de la Física . Barcelona: Ariel, 1976.

BUTTERFIELD, H. The Whig Interpretation of History . Londres: G. Bell and Sons, 1931.

CAILLOT, C. La théorie de la transposition didactique est-elle transposable? . In: RAISKY, C.; CAILLOT, M. (Ed.). Au-delà des didactiques, le didactique: débats autour des concepts fédérateurs. Bruxelles: De Boeck Université, 1996.

CAPOZZOLI, U. O envolvimento com o átomo. 1. ed. São Paulo: Duetto, 2008. (História da Ciência no Brasil). ISBN 978857902052.

CAPOZZOLI, U. Abertura para o conhecimento. 1. ed. São Paulo: Duetto, 2009. (História da Ciência no Brasil). ISBN 978857902051.

CHAMIZO-GUERREIRO, J. A. Las aportaciones de Toulmin a la Enseñanza de las Ciencias. Enseñanza de las Ciencias, v. 25, n. 1, p. 133–146, 2007.

CHEVALLARD, Y. La transposición didáctica: del saber sabio al saber enseñado. 3. ed. Buenos Aires: Aique Grupo Editor, 1991. 196 p.

COELHO, M. C. A epistemologia de uma viagem. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011. 176 p. ISBN 9788578610937.

CORDEIRO, M. D.; PEDUZZI, L. O. Q. As Conferências Nobel

de Marie e Pierre Curie: a gênese da radioatividade no ensino. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 27, n. 3, 2010.

CORDEIRO, M. D.; PEDUZZI, L. O. Q. Aspectos da natureza da Ciência e do trabalho científico no período inicial de desenvolvimento da radioatividade. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, n. 3, 2011.

CORDEIRO, M. D. ; PEDUZZI, L. O. Q. Consequências das descontextualizações em um livro didático: uma análise do tema radioatividade. *Revista Brasileira de Ensino de Física (Online)*, v. 35, p. 3602-1-3602-11, 2013.

DELIZOICOV, N. C.; CARNEIRO, M. H. d. S.; DELIZOICOV, D. O movimento do sangue no corpo humano: do contexto da produção do conhecimento para o do seu ensino. *Ciência&Educação*, v. 10, n. 3, 2004.

DINGLER, H. *Physik und Hypothese* . Berlim: W. de Gruyter, 1921.

DUARTE, M. C. História da Ciência na prática de professores portugueses: implicações para a formação de professores de Ciências. *Ciência & Educação*, v. 10, n. 3, p. 317–331, 2004.

DUSCHL, R. A. Science Education and Philosophy of Science Twenty-Five Years of Mutually Exclusive Development. *School Science and Mathematics*, v. 87, n. 7, p. 541–555, 1985.

EINSTEIN, A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper . *Annalen der Physik*, v. 17, p. 891–921, 1905.

EINSTEIN, A. Über die Relativitätsprinzip geforderte Tragheit de Energie. *Annalen der Physik*, v. 4, n. 23, p. 371–384, 1907a.

EINSTEIN, A. Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. *Radioaktivität und Elektronik*, v. 4, p. 5–28 (411–462), 1907b.

EINSTEIN, A. Le Principe de Relativité et ses Conséquences dans la Physique Moderne . *Archives des Sciences Physiques et Naturelles*, v. 29, p. 125–144, 1910.73

EINSTEIN, A. Die Relativitätstheorie. *Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft*, v. 56, p. 1–14, 1911.

EINSTEIN, A. Vom Relativitäts-Prinzip . *Vossische Zeitung*, n. 209, p. 1–2, abr. 1914.

EINSTEIN, A. Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie—Gemeinverständlich . Braunschweig: Vieweg, 1917.

EINSTEIN, A. *Relativity: The Special and the General Theory: A Popular Exposition* . Londres: Methuen, 1920.



EINSTEIN, A. *The Meaning of Relativity*. Princeton: Princeton University Press, 1921.

EINSTEIN, A. *The Principle of Relativity*. Londres: Methuen and Company, 1923.

EINSTEIN, A. *O Significado da Relatividade*. Coimbra: Editora Coimbra, 1984.

EINSTEIN, A.; INFELD, L. *A evolução da Física*. 1. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2008. 248 p. ISBN 9788537800522.

EL-HANI, C. N. Notas sobre o ensino de história e filosofia da Ciência na educação científica de nível superior. In: SILVA, C. C. (Ed.). *Estudos de história e filosofia das Ciências: subsídios para aplicação no ensino*. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2006. p. 3–21.

EL-HANI, C. N.; TAVARES, E. J. M.; ROCHA, P. L. B. Concepções epistemológicas de estudantes de biologia e sua transformação por uma proposta explícita de ensino sobre a História e Filosofia das Ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 9, n. 3, 2004.

EMPÍRICUS, S. *Adversus Physicos I*. Londres: Heinemann, 1960. 117 p.

FERNÁNDEZ, I. *Análisis de las concepciones docentes sobre la actividad científica: una propuesta de transformación*. Tese (Doutorado), 2000.

FERNÁNDEZ, I. *et al.* Visiones deformadas de la Ciencia transmitidas por la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 20, n. 3, p. 477–488, 2002.

FERNÁNDEZ, I. M. *et al.* ¿Qué visiones de la ciencia y de la actividad científica tenemos y transmitimos? In:

GIL-PÉREZ, D. *et al.* (Ed.). *¿Cómo promover el interés por la cultura científica? Una propuesta didáctica fundamentada para la educación científica de jóvenes de 15 a 18 años*. Santiago: OREAL/UNESCO, 2005. p. 29–62.

FIELD, J. H. Space-time invariance: Special relativity as a symmetry principle. *American Journal of Physics*, v. 69, p. 569–575, 2001.

FLUCKINGER, M. *Albert Einstein in Bern*. Berna: P. Haupt, 1974. 156 p.

FORATO, T. C. M.; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. *Historiografia e natureza da Ciência na sala de aula*. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 28, n. 1, 2011.

FRAASSEN, B. C. van. *A introduction to the Philosophy of Time*

and Space. 10. ed. New York: Random House, 1970. 224 p.

FRANK, P.; ROTHE, H. Über die Transformation der Raum-Zeitkoordinaten von ruhenden auf bewegte Systeme, *Annalen der Physik*, v. 34, p. 825–855, 1911.

FRIEDMAN, Y.; GOFMAN, Y. Relativistic linear spacetime transformations based on symmetry. *Foundations of Physics*, v. 32, p. 1717–1736, 2002.

FRITZ, K. von. *Schriften zur griechischen Logik*. Stuttgart: Fromann-Holzboog, 1978.

FöLSING, A. *Albert Einstein*. New York: Viking, 1997.

GARCÍA-CARMONA, A.; VÁZQUEZ, A.; y MANASSERO, M. A. Estado actual y perspectivas de la enseñanza de la naturaleza de la ciencia: una revisión de las creencias y obstáculos del profesorado. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 28, n.3, 2011.

GIERE, R. N. *Explaining science: a cognitive approach*. Chicago: The University of Chicago Press, 1988.

GIL-PEREZ, D. Contribución de la Historia y de la Filosofía de las Ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 11, n. 2, p. 197–212, 1993.

GIL-PEREZ, D. *et al.* Para uma imagem não deformada do trabalho científico. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 2, p. 125–153, 2001. Acesso em: 4 de agosto de 2010. Disponível em: <<http://www2.fc.unesp.br/cienciaeeducacao>>.

GOLDBERG, S. Henri Poincare and Einstein's Theory of Relativity. *American Journal of Physics*, v. 35, p. 934–944, 1967.

GRECA, I. (2002). Discutindo aspectos metodológicos da pesquisa em ensino de ciências: algumas questões para refletir. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 2(1)73-82.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Mecânica*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008a. (Fundamentos da Física, v. 1).74

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Óptica e Física Moderna*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008b. (Fundamentos da Física, v. 4).

HÖTTECKE, D.; SILVA, C. C. Why implementing history and philosophy in school science education is a challenge: an analysis of obstacles. *Science & Education*, v. 20, n. 3-4, p. 293–316, 2011.

HYGINO, C. B.; SOUZA, N. S.; LINHARES, M. P. Episódios da história da ciência em aulas de física com alunos jovens e adultos: uma proposta didática articulada ao método de estudo de caso. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 12, n. 1, p. 1-23, 2013.

HYGINO, C. B.; SOUZA, N. S.; LINHARES, M. P. Reflexões sobre a Natureza da Ciência em aulas de Física: estudo de um episódio histórico do Brasil colonial. *Experiências em Ensino de Ciências*, v.7, n. 2, 2012.

IGNATOWSKI, W. Einige allgemeine Bemerkungen zum Relativitätsprinzip. *Physikalische Zeitschrift*, v. 12, p. 972–976, 1910.

JAMMER, M. *Concepts of Space: The History of Theories of Space in Physics*. 1. ed. Cambridge: Harvard University Press, 1954. ISBN 0486271196.

JAMMER, M. *Concepts of Force: A Study in the Foundations of Dynamics*. Cambridge: Harvard University Press, 1957. ISBN 048640689X.

JAMMER, M. *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*. [S.l.]: Harvard University Press, 1961. ISBN 0486299988.

JAMMER, M. *Concepts of Mass in Contemporary Physics and Philosophy*. New Jersey: Princeton University Press, 2000. ISBN 069101017X.

JAMMER, M. *Concepts of simultaneity : from antiquity to Einstein and beyond*. 1. ed. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2006. 338 p. ISBN 0801884225.

KAUFFMAN, L. H. Transformations in Special Relativity. *International Journal of Theoretical Physics*, v. 24, p. 223–236, 1985.

KLEIN, M. J. Use and Abuse of Historical Teaching in Physics. In: BRUSH, S. G.; KING, A. L. (Ed.). *History in the Teaching of Physics*. 1. ed. Hanover: UPNE, 1972. p. 128. ISBN 9780874510652.

KRASILCHIK, M. The Scientists : an experiment in science teaching. *International Journal of Science Education*, v. 12, n. 3, p. 282–287, 1990.

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

LAKATOS, I. *Historia de la ciencia y sus reconstrucciones racionales*. Madri: Tecnos, 1982.

LAUDAN, L. *Science and values: the aims of science and their role in the scientific debate*. Berkeley: University of California Press, 1984.

LAUDAN, L. *Progresso e seus problemas: Rumo a uma teoria do crescimento científico*. São Paulo: UNESP, 2011. 346 p.

LEDERMAN, N.G. *Nature of Science: Past, Present, and Future*. In Abell, S.K. and Lederman, N.G. (Eds.). *Handbook of Research on*

Science Education. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, p. 831-880.

LEIBNIZ, G. *Initium rerum Mathematicarum metaphysica*. In: GERHARDT, I. C. (Ed.). *Leibnizens Mathematische Schriften*. Weidmann: Halle, 1855. v. 7.

LIMA, A. A.; NÚÑEZ, I. B. Reflexões acerca da natureza do conhecimento químico: uma investigação na formação inicial de professores de química. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 11, n. 3, 2011.

LOFLAND, J. *Analysing social settings aguide to qualitative observation and analysis*. Belmont: C. A. Wodsworth Publishing, 1971. 234 p.

LOWE, R. K. Animation and learning: selective processing of information in dynamic graphics. *Learning Instruction* 13, p. 157–176, 2003.

LOWE, R. K. Animation and learning: Value for money? In R. Atkinson, C. McBeath, D. Jonas-Dwyer & R. Phillips (Eds), *Beyond the comfort zone: Proceedings of the 21st ASCILITE Conference*, p. 558-561, 2004.

MARANDINO, M. A prática de ensino nas licenciaturas e a pesquisa em ensino de Ciências: questões atuais. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 20, n. 2, p. 168–193, 2003.

MARANDINO, M. Transposição ou recontextualização? Sobre a produção de saberes na educação em museus de Ciências. *Revista Brasileira de Educação*, n. 26, p. 95–108, 2004.

MARIN, N.; BENARROCHI, A. Desarrollo, validación y evaluación de un cuestionário de opciones múltiples para identificar y caracterizar las visiones sobre la Natureza de la Ciencia de profesores en formación. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 27, n. 1, p. 89–108, 2009.

MARIN, N.; BENARROCHI, A. Cuestionario de opciones múltiples para evaluar creencias sobre el aprendizaje de las ciencias. *Enseñanza de las Ciências*, v. 28, n. 2, p. 245–260, 2010.

MARTINAND, J. L. *Contribution a La caracterization des objectifs pour l initiation aux sciences et techniques*. Tese (Doutorado), 1982.75

MARTINS, A. F. P.; ZANETIC, J. O tempo na mecânica: de coadjuvante a protagonista. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 19, n. 2, 2002.

MARTINS, J. B. José Leite Lopes: o homem de Ciência. 1. ed. Rio de Janeiro: UERJ, 1989.

MARTINS, J. B. A história do átomo: de Demócrito aos quarks.

1. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2002.

MARTINS, J. B. A história da eletricidade: os homens que desenvolveram a eletricidade. 1. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2007.

MARTINS, J. B. A vitória de Galileu. 1. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008. ISBN 9788573937343.

MARTINS, R. A. O princípio de antecedência das causas na teoria da relatividade. Anais da ANPOF, v. 1, n. 1, p. 51–72, 1986. Disponível em: <<http://www.ghic.usp.br/server/pdf/ram-29.pdf>>.

MARTINS, R. A. Introdução: a história das Ciências e seus usos na educação. In: SILVA, C. (Ed.). Estudos de história e filosofia das Ciências: subsídios para aplicação no ensino. São Paulo: Livraria da Física, 2006. cap. Introdução, p. xvii–xxx.

MARTINS, R. d. A. O que é a Ciência do ponto de vista da epistemologia? . Ca- derno de Metodologia e Técnica de Pesquisa, n. 9, p. 5–20, 1999.

MATTHEWS, M. History, Philosophy, and Science Teaching: The Case of Pendulum Motion. Research in Science Education, v. 19, n. 1, p. 187–198, 1990.

MATTHEWS, M. Science teaching: the role of History and Philosophy of Science. 1. ed. London: Routledge, 1994. ISBN 0415902827.

MATTHEWS, M. História, Filosofia e Ensino de Ciências: a tendência atual de reaproximação. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 12, n. 3, p. 164–214, dez. 1995. Acesso em: 4 de agosto de 2010. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica>>.

MAXWELL, J. C. Faraday: a história química de uma vela. 1. ed. Rio de Janeiro: Contraponto, 2003. ISBN 8585910526.

MAYER, R. E. (2003). The promise of multimedia learning: using the same instructional design methods across different media. Learning Instruction, v. 13, 125–139, 2003.

MAYER, R. E.; ANDERSON, R. B. The instructive animation: helping students build connections between words and pictures in multimedia learning. J. Educ. Psychol. v. 84, p. 444–452, 1992.

MERMIN, D. Relativity without light. American Journal of Physics, v. 52, p. 119–124, 1984.

MESQUITA, N. A. d. S.; SOARES, M. H. F. B. Visões de Ciência em desenhos animais: uma alternativa para o debate sobre a construção do conhecimento científico em sala de aula. Ciência &

Educação, v. 14, n. 3, 2008.

MOHR, R. D. *The Platonic Cosmology*. Leiden: Brill, 1985. 54 p.

MORAES, A. G. *et al.* Representações sobre Ciência e suas implicações para o ensino da Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 7, n. 2, p. 120–127, ago. 1990. Acesso em: 4 de agosto de 2010. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica>>.

MOREIRA, M. A. A Teoria da Aprendizagem Significativa segundo Ausubel. In: *Aprendizagem Significativa: condições para a ocorrência e lacunas que levam a comprometimentos*. São Paulo: Vetor, 2008. cap. 1, p. 295.

NEWTON, I. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Londres: Streater, 1687.

NEWTON, I. *The Principia*. Berkeley: University of California Press, 1999.

NICOLODELLI, D. Mapas Conceituais como ferramentas para a organização do conhecimento em uma disciplina sobre a História da Física. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2011.

NORTON, J. D. Einstein's Investigations of Galilean Covariant Electrodynamics Prior to 1905. *Archive for History of Exact Sciences*, v. 59, p. 45–105, 2004.

NUSSENZVEIG, H. M. *Ótica, Relatividade, Física Quântica*. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998. 437 p.

NUSSENZVEIG, H. M. *Mecânica*. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2002.

O'DAY, D. H. *Animated Cell Biology: A Quick and Easy Method for Making Effective, High-Quality Teaching Animations*. CBE – Life Sciences Education. v. 5, p. 255-263, 2006.

OKI, M. C. M.; MORADILLO, E. F. O ensino de história da Química: contribuindo para a compreensão da natureza da Ciência. *Ciência & Educação*, v. 14, n. 1, 2008.

OLEQUES, L. C.; BOER, N.; BARTHOLOMEI-SANTOS, M. L. B. Reflexões acerca das diferentes visões sobre a natureza da ciência e crenças de alunos de um curso de Ciências Biológicas. *REEC. Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 12, p. 110-125, 2013.

OLIVEIRA, F. F. de. O ensino de Física Moderna com enfoque CTS: uma proposta metodológica para o ensino médio usando o tópico raios x. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2006.

PEDUZZI, L. O. Q. Sobre a utilização didática da História da Ciência. In: PIETROCOLA, M. (Ed.). Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora. 1. ed. Florianópolis: EDUFSC, 2001. cap. 7, p. 151–170.

PEDUZZI, L. O. Q. ; PEDUZZI, S. S. . Física Básica A (2. ed.). 2. ed. Florianópolis: UFSC/EAD/CED/CFM, 2009b. v. 1. 270p.

PEDUZZI, L. O. Q. ; PEDUZZI, S. S. . Física Básica B (2.ed.). 2. ed. Florianópolis: UFSC/EAD/CED/CFM, 2010c. v. 1. 138p .

PEDUZZI, L. O. Q. Do próton de Rutherford aos quarks de Gell-Mann, Nambu... Publicação interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

PEDUZZI, L. O. Q. Força e movimento: de Thales a Galileu. Publicação interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015a.

PEDUZZI, L. O. Q. Da física e da cosmologia de Descartes à gravitação newtoniana. Publicação interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015b.

PEDUZZI, L. O. Q. Do átomo grego ao átomo de Bohr. Publicação interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015c.

PEDUZZI, L. O. Q. A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica. Publicação interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015d.

PENA, F. L. A. Sobre a presença do Projeto Harvard no sistema educacional brasileiro. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, n. 1, 2012.

PIRES, A. S. T. Evolução das idéias da Física. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011. ISBN 9788578611033.

PLATÃO. Timaeus. [S.l.: s.n.]. 38B p.

POINCARÉ, H. The Foundations of Science . New York: The Science Press, 1913. 306–307 p.

POINCARÉ, H. La Valeur de la Science . Paris: Flammarion, 1923. 35–58 p.

POINCARÉ, H. O Valor da Ciência. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995. 173 p.

POPPER, K. La lógica de la investigación científica . Madri: Tecnos, 1962.

PRAXEDES, G.; PEDUZZI, L. O. Q. Tycho Brahe e Kepler na escola: uma contribuição à inserção de dois artigos em sala de aula. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 31, n. 3, 2009.

QUEIRÓS, W. P.; BATISTETI, C. B.; JUSTINA, L. A. I. Tendências das Pesquisas em História e Filosofia da Ciência e Ensino de Ciências: o que o ENPEC e o EPEF nos revelam? In: MORTIMER, E. F. (Ed.). Anais do VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências. Florianópolis: ABRAPEC, 2009. Disponível em: <<http://www.foco.fae.ufmg.br/viiienpec/index.php/enpec/viiienpec>>.

REICHENBACH, H. Relativitätstheorie und Erkenntnis Apriori . [S.l.]: Springer, 1920.

REICHENBACH, H. Der gegenwärtige Stand der Relativitätsdiskussion . Logos, v. 10, p. 316–378, 1922.

REICHENBACH, H. Axiomatik der relativistischen Raum-Zeit-Lehre . Braunschweig: Vieweg, 1924.

REICHENBACH, H. The Theory of Relativity and A Priori Knowledge . University of California Press, Berkeley, 1965.

REZENDE, F. S.; FERREIRA, L. N. A.; QUEIROZ, S. L. Concepções a respeito da construção do conhecimento científico: uma análise a partir de textos produzidos por estudantes de um curso superior de química. Revista Eletrônica de Enseñanza de las Ciencias, v. 9, n. 3, 2010.

RICARDO, E. C.; ZYLBERSZTAJN, A. Os Parâmetros Curriculares Nacionais na formação inicial dos professores das Ciências da natureza e matemática do ensino médio . Investigações em Ensino de Ciências, v. 12, n. 3, p. 339–355, 2007.

ROCHA, J. F. Origem e evolução das ideias da Física. 1. ed. Salvador: EDUFBA, 2002. ISBN 8523202544.

ROONEY, Anne. A História da Física: da Filosofia ao Enigma da Matéria Negra. 1 ed. São Paulo: Makron Books, 2013.

ROSA, K.; MARTINS, M. C. A inserção de História e Filosofia da Ciência no currículo de Licenciatura em Física da Universidade Federal da Bahia: uma visão de professores universitários. Investigações em Ensino de Ciências, v. 12, n. 3, 2007.

RUSSELL, B. Our Knowledge of the External World . Londres: George Allen & Unwin, 1926. 183 p.

SCRIBNER, C. Mistranslation of a passage in Einstein's original paper on relativity . American Journal of Physics, v. 31, p. 398, 1963.

SEARS, F. *et al.* Física I: Mecânica. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008a.

SEARS, F. *et al.* Física IV: Ótica e Física Moderna. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008b.

SILVA, Ana Paula Bispo da ; FORATO, T. C. M. ; GOMES, J. L.



A. M. C. Concepções sobre a natureza do calor em diferentes contextos históricos. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 30, p. 492-537, 2013.

SILVEIRA, A. F. *et al.* Natureza da Ciência numa sequência didática: Aristóteles, Galileu e o movimento relativo. *Experiências em Ensino de Ciências*, v. 5, n. 1, 2010.

SPIRO, R. J., Feltovich, P. J., Jacobson, M. J., & Coulson, R. L. Cognitive flexibility, constructivism, and hypertext: Random access instruction for advanced knowledge acquisition in ill-structured domains. In T. M. Duffy & D. H. Jonassen (Eds.), *Constructivism and the technology of instruction: A conversation*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, p. 57-76, 1992.

STUMP, E.; KRETZMANN, N. Eternity. *The Journal of Philosophy*, v. 78, p. 429–458, 1981.

SWELLER, J. Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning Instruction*, v. 4, p. 295–312, 1994.

TAKIMOTO, E. *História da Física na sala de aula*. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2009. ISBN 9788578610128.

TEIXEIRA, E. S.; FREIRE, O.; EL-HANI, C. N. A influência de uma abordagem contextual sobre as concepções acerca da natureza da Ciência de estudantes de Física. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 9, n. 1, 2009.

TEIXEIRA, E. S.; GRECA, I. M.; FEIRE, O. Uma revisão sistemática das pesquisas publicadas no Brasil sobre o uso didático de História e Filosofia da Ciência no Ensino de Física. In: *Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino*. Natal: EDUFRN, 2012. p. 9–40.77

TEIXEIRA, E. S.; GRECA, I. M.; FREIRE, O. The History and Philosophy of Science in Physics Teaching: A Reserch Syntesis of Didatic Interventions. *Science & Education*, 2009.

TEIXEIRA, E. S.; PEDUZZI, L. O. Q.; FEIRE, O. Os caminhos da Newton para a gravitação universal: uma revisão do debate historiográfico entre Cohen e Wetfall. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 27, n. 2, 2010.

THUILLIER, P. *De Arquimedes a Einstein*. 1. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1994. ISBN 8571102724.

TOBALDINI, B. G. *et al.* Aspectos sobre a natureza da Ciência apresentados por alunos e professores de licenciatura em Ciências biológicas. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 10, n. 3, 2011.

TOLMIN, S. La comprensión humana: el uso colectivo y la evolución de los conceptos . Madri: Alianza, 1977.

TOMAZI, A. L. *et al.* O que é e quem faz Ciência? Imagens sobre a atividade científica divulgadas em filmes de animação infantil. Ensaio Pesquisa Educação Ciência, v. 11, n. 2, 2009.

TRIVINÔS, A. N. S. Introdução à pesquisa em Ciências Sociais. São Paulo: Atlas, 1987. 175 p.

TVERSKY, B.; MORRISON, J. B. Animation: can it facilitate? Int. J. Human Comput. Stud. v. 57, p. 247–262, 2002.

VANNUCCHI, A. História e Filosofia da Ciência: da teoria para a sala de aula. 131 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

VERRET, M. Le temps des études. Tese (Doutorado), Paris, 1975.

VILAS-BOAS, A.; SILVA, M. R., PASSOS, M. M.; ARRUDA, S. M. História da Ciência e Natureza da Ciência: Debates e consensos. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 30, n. 2: p. 287-322, 2013.

VILELA-RIBEIRO, E. B.; BENITE, A. M. C. Concepções sobre natureza da Ciência e ensino de Ciências: um estudo das interações discursivas em um Núcleo de Pesquisa em Ensino de Ciências . Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, v. 9, n. 1, 2009.

WERTHEIMER, M. Productive Thinking . New York: Harper and Brothers, 1945. 213–233 p.

WHITAKER, M. A. B. History and Quasi-history in Physics Education [parte I e II]. Physics Education, v. 14, p. 108–112, 239–242, 1979.

WHITROW, G. J. O Tempo na História. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1993.

ZANETIC, J. Física também é Cultura. Tese (Doutorado) — Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, 1989. Tese de Doutorado em Educação.