

Thaísa Carneiro da Cunha Guio

**Uma sequência didática para o ensino  
de Física de Partículas no ensino médio:  
indícios de alfabetização científica  
e engajamento de estudantes**

Vitória - ES, Brasil

2020



Thaís Carneiro da Cunha Guio

**Uma sequência didática para o ensino  
de Física de Partículas no ensino médio:  
indícios de alfabetização científica  
e engajamento de estudantes**

Monografia apresentada ao curso de  
Graduação em Licenciatura em Física  
da Universidade Federal do Espírito  
Santo como requisito essencial para a  
conclusão do curso e obtenção do título  
de licenciada em Física.

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Departamento de Física

Orientador: Prof. Dr. Geide Rosa Coelho

Vitória - ES, Brasil

2020

Thaisa Carneiro da Cunha Guio

**Uma sequência didática para o ensino  
de Física de Partículas no ensino médio:  
indícios de alfabetização científica  
e engajamento de estudantes**

Monografia apresentada ao curso de  
Graduação em Licenciatura em Física  
da Universidade Federal do Espírito  
Santo como requisito essencial para a  
conclusão do curso e obtenção do título  
de licenciada em Física.

Aprovada em: 18 de dezembro de 2020.

Comissão Examinadora:

---

**Prof. Dr. Geide Rosa Coelho**  
Orientador PPGEnFis/UFES

---

**Prof. Dr. Flávio Gimenes Alvarenga**  
Convidado PPGEnFis/UFES

---

**Prof. Me. Leandro da Silva Barcellos**  
Convidado PPGEnFis/UFES

Vitória - ES, Brasil

# Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Geide Rosa Coelho por acreditar no potencial deste trabalho e pela gentileza em aceitar orientá-lo. Agradeço profundamente pelo compartilhamento de sua sabedoria, pelos ensinamentos ao longo de minha trajetória na Licenciatura, e pelas profundas e pertinentes conversas durante as disciplinas de Estágio Supervisionado. Tornou-se para mim um exemplo de profissional extremamente competente e humano, com seu jeito simpático e sua constante dedicação a tudo que faz, sempre com muito entusiasmo e carinho.

Aos Prof. Dr. Júlio César Fabris, Prof. Dr. Gláuber Carvalho Dorsch e Prof. Me. Thiago Pereira da Silva, por possibilitarem a execução deste trabalho dentro do contexto do projeto de extensão “Universo na Escola”, do grupo Cosmo-UFES.

Aos Prof. Dr. Flávio Gimenes Alvarenga e Prof. Me. Leandro da Silva Barcellos por aceitarem gentilmente o convite para comporem minha banca. Ao Leandro agradeço também pelos ensinamentos e conversas ao longo de diversas disciplinas fundamentais de minha trajetória na Licenciatura.

Às novas amigadas feitas com colegas da Licenciatura em Física e de outras Licenciaturas da UFES, e com professores da UFES e da rede pública de ensino, que deixaram suas marcas não só durante minha jornada nessa graduação mas sim para toda a minha vida. Meus agradecimentos especiais à Prof<sup>a</sup> Ma. Rosa Maria Ambrózio, que foi minha mentora durante estágio na rede pública estadual de ensino.

Em um caráter mais pessoal, renovo os agradecimentos ao meu companheiro de vida, Gláuber Carvalho Dorsch, pela parceria em sala de aula na execução deste trabalho, por todo o apoio e o companheirismo de sempre ao longo de mais essa etapa em minha vida, e pela compreensão diante dos sacrifícios realizados.

À minha família, pela educação ao longo de minha formação como cidadã no mundo. Também agradeço pela liberdade fornecida para perseguir meus próprios caminhos a partir de condições que favoreceram minha dedicação integral à trajetória acadêmica.

Muito obrigada!



*“(...) a formação técnico-científica não é antagônica à formação humanista dos homens, desde que ciência e tecnologia, na sociedade revolucionária, devem estar a serviço de sua libertação permanente, de sua humanização.”*

Paulo Freire, *Pedagogia do Oprimido*



# Resumo

Estudos recentes apontam que a Física de Partículas é um dos tópicos da Física Moderna e Contemporânea que mais desperta a atenção de estudantes do ensino médio. Docentes e pesquisadores de Física em geral e de ensino em Física também a reforçam como uma temática que deveria ser incorporada nas salas de aula do ensino médio. No entanto, sugestões concretas sobre como introduzi-la em salas de aula são praticamente inexistentes.

Neste trabalho apresentamos uma proposta de sequência didática para o ensino de Física de Partículas no ensino médio. A sequência foi aplicada a um grupo de quatorze estudantes das 1<sup>a</sup> à 3<sup>a</sup> séries do ensino médio do Centro Estadual de Ensino Médio em Tempo Integral (CEEMTI) Prof<sup>a</sup> Maura Abaurre, no município de Vila Velha, no estado do Espírito Santo.

Nossa proposta visa apresentar a Física de Partículas a partir de uma discussão sistematizada sobre o assunto, englobando não só a compreensão de seus conceitos-chave, mas também da própria natureza da Ciência, dos fatores que circundam sua prática e sua relação com tecnologia, sociedade e meio-ambiente. A análise das intervenções demonstrou, conclusivamente, que a sequência proposta, aliada à mediação pedagógica estabelecida pelo professor, promoveu a alfabetização científica e um elevado grau de engajamento dos estudantes.

Esperamos que os resultados deste trabalho indiquem a viabilidade e as potencialidades de se incorporar temáticas da Física Moderna e Contemporânea no ensino médio, não só por despertar a curiosidade científica, mas também por facilitar um processo de ensino-aprendizagem sólido pautado na imersão dos estudantes em campos do conhecimento que revolucionaram a sociedade contemporânea, fornecendo-lhes autonomia para desenvolver reflexões e ações enquanto cidadãos críticos do mundo.

**Palavras-chave:** Ensino de Física, Ensino Médio, Física Contemporânea, Física de Partículas, Alfabetização Científica, Engajamento.



# Abstract

Recent studies have shown that Particle Physics is one of the topics in Modern and Contemporary Physics that draws most attention from high school students. Teachers and researchers in Physics and on Physics education also reinforce it as one of the themes that should be incorporated into high school classrooms. However, concrete suggestions to introduce it into classrooms are almost non-existent.

In this work we present a teaching sequence for Particle Physics in high school. The sequence was applied to a group of fourteen students from the 1<sup>st</sup> to the 3<sup>rd</sup> year high school classes at *Centro Estadual de Ensino Médio em Tempo Integral (CEEMTI) Prof<sup>a</sup> Maura Abaurre*, in the city of Vila Velha, in Espírito Santo (Brazil).

Our proposal aims to present Particle Physics with a systematic discussion about the subject, covering not only the understanding of its key concepts, but also of the very nature of Science, of the factors that surround its practice and of its relations with technology, society and the environment. The analysis of the interventions has conclusively demonstrated that the proposed sequence, together with the pedagogical mediation established by the teacher, promoted scientific literacy and a high level of engagement by the students.

We hope that the results of this work will indicate the viability and the potencialities of incorporating themes from Modern and Contemporary Physics into high school, not only because it raises the students' scientific curiosity, but also because it facilitates a solid teaching-learning process based on the immersion of the students in fields of knowledge that revolutionized contemporary society, giving them autonomy to develop thoughts and actions as critical citizens of the world.

**Keywords:** Physics teaching, High School, Contemporary Physics, Particle Physics, Scientific Literacy, Engagement.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de Feynman ilustrando a interação entre dois elétrons mediada pela troca de um fóton. . . . .	39
Figura 2 – Criação de um par elétron-pósitron visualizado em uma câmara de bolhas. Fonte: CERN. . . . .	40
Figura 3 – Ações do fazer científico referentes ao primeiro bloco de aulas. A legenda está ordenada no sentido anti-horário do gráfico a partir de “seriação de informações” (azul escuro, 20,07%). . . . .	119
Figura 4 – Operações epistemológicas que caracterizam as ações do fazer científico do primeiro bloco de aulas. . . . .	120
Figura 5 – Ações do fazer científico referentes ao segundo bloco de aulas. A legenda está ordenada no sentido anti-horário do gráfico a partir de “seriação de informações” (azul escuro, 14,45%). . . . .	122
Figura 6 – Operações epistemológicas que caracterizam as ações do fazer científico do segundo bloco de aulas. . . . .	122
Figura 7 – Ações do fazer científico referentes ao terceiro bloco de aulas. A legenda está ordenada no sentido anti-horário do gráfico a partir de “seriação de informações” (azul escuro, 13,17%). . . . .	124
Figura 8 – Operações epistemológicas que caracterizam as ações do fazer científico do terceiro bloco de aulas. . . . .	124
Figura 9 – Ações do fazer científico referentes ao quarto bloco de aulas. A legenda está ordenada no sentido anti-horário do gráfico a partir de “seriação de informações” (azul escuro, 22,37%). . . . .	125
Figura 10 – Operações epistemológicas que caracterizam as ações do fazer científico do quarto bloco de aulas. . . . .	126
Figura 11 – Evolução do número de intervenções que manifestaram o primeiro indicador de engajamento comportamental (participação nas aulas, <b>E-II</b> ) dos cinco alunos com maior presença física nas aulas durante a sequência. . . . .	129
Figura 12 – Enunciado da atividade para casa entregue aos alunos após a quinta aula da sequência. . . . .	130
Figura 13 – Evolução do número de intervenções que manifestaram o primeiro indicador de engajamento cognitivo (investimento no aprendizado, <b>E-III1</b> ) dos cinco alunos com maior presença física nas aulas durante a sequência. . . . .	136

Figura 14 – Evolução do número de intervenções que manifestaram o segundo indicador de engajamento cognitivo (autonomia, <b>E-III2</b> ) dos cinco alunos com maior presença física nas aulas durante a sequência. . . . .	137
Figura 15 – Evolução do número de intervenções que manifestaram o terceiro indicador de engajamento cognitivo (desejo de ir além do básico, <b>E-III3</b> ) dos cinco alunos com maior presença física nas aulas durante a sequência.	137
Figura 16 – Evolução do número de intervenções que manifestaram o quarto indicador de engajamento cognitivo (uso de estratégias, <b>E-III4</b> ) dos cinco alunos com maior presença física nas aulas durante a sequência. . . . .	138

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Os momentos da primeira aula da sequência. . . . .	35
Tabela 2 – Os momentos da segunda aula da sequência. . . . .	38
Tabela 3 – Os momentos da terceira aula da sequência. . . . .	41
Tabela 4 – Os momentos da quarta aula da sequência. . . . .	43
Tabela 5 – Os momentos da quinta aula da sequência. . . . .	44
Tabela 6 – Os momentos da sexta aula da sequência. . . . .	46
Tabela 7 – Os momentos da sétima aula da sequência. . . . .	48
Tabela 8 – Os momentos da oitava aula da sequência. . . . .	49
Tabela 9 – Os momentos da nona aula da sequência. . . . .	50
Tabela 10 – Os momentos da décima aula da sequência. . . . .	51
Tabela 11 – As ações do fazer científico, com os respectivos códigos a serem utilizados no capítulo 3, referente à análise, resultados e discussões. . . . .	54
Tabela 12 – Operações epistemológicas que relacionam ações do fazer científico com os respectivos códigos a serem utilizados no capítulo 3, referente à análise, resultados e discussões. Em “Consistência (compromisso com)” entendemos a manifestação do desejo em ser consistente durante a execução das ações do fazer científico. Tabela baseada na proposta de Jiménez-Aleixandre, Díaz e Duschl (1998, p. 7). Ver também JIMÉNEZ-ALEIXANDRE; RODRÍGUEZ; DUSCH [2000], p. 768. Notar que em nossa tabela desconsideramos a operação de consistência metafísica pois esse indicador não ocorreu uma única vez durante as aulas. . . . .	56
Tabela 13 – Operações de argumento e seus respectivos códigos de referência para a análise da argumentação no decorrer das aulas da sequência didática aqui proposta. . . . .	58
Tabela 14 – Níveis hierárquicos e seus respectivos códigos de referência para a análise da argumentação no decorrer das aulas da sequência didática aqui proposta. . . . .	58
Tabela 15 – Indicadores de engajamento comportamental elaborados para a análise de dados, seus níveis e códigos correspondentes. . . . .	60
Tabela 16 – Indicadores de engajamento emocional elaborados para a análise de dados, seus níveis e códigos correspondentes. A notação “n.p.” indica não serem presentes frases verbalizadas, mas a ocorrência do indicador em nível ótimo ou insatisfatório apenas com a presença de expressões positivas, como risos e/ou gargalhadas, ou expressões negativas, demonstrando insatisfação, repulsa, entre outros, respectivamente. . . .	62

Tabela 17 – Indicadores de engajamento cognitivo elaborados para a análise de dados, seus níveis e códigos correspondentes. . . . .	63
Tabela 18 – A duração das aulas da sequência em minutos, o total de intervenções dos alunos em cada uma delas, o número de alunos e a média de intervenções por aluno. As duas últimas colunas apresentam os números de momentos/sub-momentos e a média de intervenções por momento/sub-momento, respectivamente. . . . .	127
Tabela 19 – Os indicadores de engajamento emocional mais recorrentes nos cinco alunos com maior presença, em cada um dos quatro blocos de aulas da sequência. A entrada “–” significa que o(a) aluno(a) não esteve presente no bloco de aulas em questão. . . . .	131
Tabela 20 – Níveis de engajamento (ótimo, regular ou insatisfatório) dos alunos Werner, Albert, Marie, Peter e Emmy, os mais presentes durante a sequência de aulas. . . . .	139

# Lista de abreviaturas e siglas

BNCC	Base Nacional Curricular Comum
CEEMTI	Centro Estadual de Ensino Médio em Tempo Integral
CERN	Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (do antigo acrônimo em francês <i>Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire</i> )
CTS	Ciência, Tecnologia, Sociedade
CTSA	Ciência, Tecnologia, Sociedade e Meio Ambiente
ENEM	Exame Nacional do Ensino Médio
FUVEST	Fundação Universitária para o Vestibular
LHC	Grande Colisor de Hádrons (do inglês <i>Large Hadron Collider</i> )
QCD	Cromodinâmica Quântica (do inglês <i>Quantum Chromodynamics</i> )
QED	Eletrodinâmica Quântica (do inglês <i>Quantum Electrodynamics</i> )
FMC	Física Moderna e Contemporânea
MACHO	Objeto com Halo Compacto e Grande Massa (do inglês <i>Massive Compact Halo Object</i> )
PET	Tomografia por Emissão de Pósitrons (do inglês <i>Positron Emission Tomography</i> )
SEDU	Secretaria da Educação
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
WIMP	Partícula Massiva de Interação Fraca (do inglês <i>Weakly Interacting Massive Particle</i> )



# Sumário

	<b>Introdução</b>	<b>19</b>
<b>1</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>23</b>
1.1	A alfabetização científica	23
1.2	Engajamento	25
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>29</b>
2.1	<b>Objetivos</b>	<b>29</b>
2.1.1	Objetivo geral	29
2.1.2	Objetivos específicos	29
2.2	<b>O contexto da pesquisa: o local e os sujeitos</b>	<b>29</b>
2.3	<b>A organização das intervenções e atividades</b>	<b>30</b>
2.4	<b>Coleta de dados</b>	<b>31</b>
2.5	<b>Uma proposta de sequência didática sobre Física de Partículas</b>	<b>32</b>
2.5.1	Aulas 1, 2 e 3: Conhecimentos prévios e as interações eletromagnética (QED) e gravitacional	32
2.5.2	Aulas 4 e 5: Física Nuclear	40
2.5.3	Aulas 6 e 7: A interação forte (QCD)	44
2.5.4	Aulas 8, 9 e 10: A interação fraca, o bóson de Higgs e além do Modelo Padrão da Física de Partículas	47
2.6	<b>Metodologia da análise de dados</b>	<b>51</b>
2.6.1	Indicadores de alfabetização científica	53
2.6.2	Indicadores de engajamento	57
<b>3</b>	<b>ANÁLISE, RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>65</b>
3.1	<b>Análise das aulas</b>	<b>65</b>
3.1.1	Aulas 1, 2 e 3: Conhecimentos prévios e as interações eletromagnética (QED) e gravitacional	66
3.1.2	Aulas 4 e 5: Física Nuclear	81
3.1.3	Aulas 6 e 7: A interação forte (QCD)	93
3.1.4	Aulas 8, 9 e 10: A interação fraca, o bóson de Higgs e além do Modelo Padrão da Física de Partículas	104
3.1.5	Alfabetização científica	119
3.1.6	Engajamento	127
3.2	<b>Considerações dos estudantes e do professor</b>	<b>142</b>
	<b>Considerações finais</b>	<b>149</b>
	<b>Referências</b>	<b>153</b>



# Introdução

## A Física Moderna e Contemporânea

Vários estudos apontam para a importância de se inserir a Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino médio. Além de despertar a curiosidade dos estudantes pela Ciência em geral e pelas carreiras científicas, temáticas mais recentes destacam o caráter da Ciência enquanto construção histórico-social humana por serem apresentadas como em pleno desenvolvimento [MONTEIRO, 2013; OSTERMANN, 2000; OSTERMANN; MOREIRA, 2000a,b; TERRAZZAN, 1992].

O caráter histórico-social da Física é aparente a partir de sua descrição como cultura: por um lado, a Física sofreu diversas influências das sociedades vigentes no decorrer da história e, em contrapartida, também as influenciou [ZANETIC, 1989]. Dessa forma, é papel da Ciência apresentada na escola preparar futuros cidadãos no mundo, que compreendam a prática científica e suas consequências [AIKENHEAD, 2005].

Uma educação que integre Ciência, Tecnologia, Sociedade e Meio-Ambiente (CTSA) através do estudos de temas locais e globais pode propiciar o desenvolvimento de valores vinculados aos interesses coletivos [SANTOS; MORTIMER, 2002; BYBEE, 1987]. A FMC, além de surgir para explicar fenômenos que a Física Clássica não explica e explorar seus limites, se constitui como um conjunto de conhecimentos que serve às necessidades do ser humano contemporâneo e extrapola formas de saber [PINTO; ZANETIC, 1999]. Portanto, a inserção da FMC no ensino médio se faz extremamente necessária a fim de estimular a compreensão dos estudantes sobre o mundo atual que lhes cerca, estabelecido em grande parte a partir de diversas mudanças do último e do presente século, de modo que reflitam sobre como nele participar e atuar para transformá-lo conscientemente [TERRAZZAN, 1992].

A apropriação dos conhecimentos científicos e de suas dimensões epistemológicas é direito de todos os estudantes [MARQUES; MARANDINO, 2018] e, especificamente, a não inclusão da FMC no ensino médio priva diversos estudantes, que acabam optando por seguir outras carreiras, de acessarem formalmente uma Física mais atual talvez pela única vez em suas vidas [TERRAZZAN, 1992]. A privação de uma parte dos estudantes a esse contato formal com a FMC favorece a mistificação de diversas de suas temáticas, tais como a Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade.

Em especial, a Física de Partículas e/ou Física de Altas Energias é um dos tópicos da FMC que parece atrair bastante a atenção tanto dos estudantes quanto dos professores. Em um estudo recente realizado no contexto do projeto internacional ROSE (*The Relevance*

of Science Education) [SCHREINER; SJØBERG, 2004; SJØBERG; SCHREINER, 2010] foram consultados, entre os anos de 2010 e 2011, 2365 estudantes do 1ª série do ensino médio de 84 escolas de todo o Brasil, perguntados sobre os tópicos científicos que mais teriam interesse em aprender nas aulas [SANTOS GOUW, 2013]. Dentre 108 itens propostos no questionário, alguns dos mais favoravelmente votados pelos(as) estudantes dizem respeito diretamente à Física de Altas Energias e/ou Física de Partículas, tais como “Como funciona a bomba atômica?” (29º mais bem votado no geral, 5º na escolha entre meninos), “Como funciona uma usina nuclear?” (43º na lista geral, 15º entre meninos), enquanto outros convidam a Física de Partículas a uma discussão multidisciplinar, como “O câncer, o que sabemos e como podemos tratá-lo?” (2º mais bem votado no geral e também 2º na escolha entre meninas), “Fenômenos que os cientistas ainda não conseguem explicar” (19º na lista geral, 11º entre meninos), “Como os telefones celulares enviam e recebem mensagens?” (25º geral, 28º entre meninos e 27º entre meninas), “Invenções e descobrimentos que transformaram o mundo” (30º geral, 20º entre meninos), “Como o raio-X, o ultrassom, etc. são usados na medicina?” (36º geral, 29º entre meninas), entre outros.

Em um outro estudo a partir de entrevistas realizadas através da técnica Delphi com 54 físicos teóricos e experimentais de diferentes áreas e instituições brasileiras, 22 pesquisadores em ensino de Física das mais diversas Universidades e 22 professores de Física do ensino médio das regiões Sul, Sudeste e Nordeste, identificou que a Física de Partículas é um dos principais tópicos da FMC levantados pelos entrevistados que devem ser levados para o ensino médio [OSTERMANN, 2000].

Portanto, tanto por parte de estudantes do ensino médio quanto por parte de seus docentes, e pesquisadores de Física em geral e de ensino de Física, a Física de Partículas merece destaque como um dos tópicos da FMC a ser incorporado nas salas de aula do ensino médio. A temática de partículas elementares vincula-se a questões mais básicas da Física, perpassando até mesmo indagações filosóficas, ilustra a interação entre teoria e prática na Física e ressalta sua faceta de modelagem e busca por simetrias na Natureza, ao mesmo tempo em que apresenta a Física como uma Ciência viva e dinâmica [OSTERMANN; MOREIRA, 2001].

A listagem de tópicos de FMC a serem introduzidos no ensino médio predomina na literatura, enquanto propostas concretas e detalhadas de introdução desses em sala de aula têm ficado em segundo plano [OSTERMANN; MOREIRA, 2001]. Outros estudos corroboram essa visão ao relatarem que, apesar de existirem estudos apontando os tópicos de FMC mais destacados para serem levados ao ensino médio, são poucas as propostas que elaboram como esse conhecimento deve chegar, de fato, às escolas [SIQUEIRA, 2006; PINTO; ZANETIC, 1999; SWIBANK, 1992]. Uma proposta pioneira voltada à formação de professores nessa temática, é apresentada no trabalho [OSTERMANN, 1999]. Uma proposta de ensino investigativo da temática de Física de Partículas, incluindo um livreto administrável aos estudantes, pode ser também consultada em [BAKALARCZYK, 2017].

## A pesquisa

O presente trabalho apresenta uma proposta de sequência didática para o ensino de Física de Partículas no ensino médio com a análise da mediação pedagógica no seu desenvolvimento na sala de aula, visando identificar indícios de alfabetização científica e engajamento por parte de estudantes do ensino médio [CARVALHO, 2004; SASSERON; CARVALHO, 2011; SASSERON, 2015].

A proposta para a sequência é semelhante à apresentada na referência [SIQUEIRA, 2006], mas aqui a elaboramos em maior nível de detalhamento dos momentos didáticos, incluindo sugestões de atividades e possíveis discussões que podem ser conduzidas em sala de aula. Dessa forma, a sequência propõe-se a apresentar a Física de Partículas não apenas como um aglomerado de curiosidades sobre partículas com nomes estranhos, mas como uma discussão sistematizada sobre o assunto, englobando a compreensão de conceitos-chave, o amadurecimento do pensamento científico dos estudantes, e *principalmente* explorando a Física de Partículas como via de desenvolvimento da compreensão da Física e da capacidade argumentativa dos estudantes.

À primeira vista essa última afirmação pode parecer contraditória a um leitor incauto: como desenvolver a compreensão de conceitos que envolvem partículas microscópicas e fenômenos que parecem tão distantes da vivência cotidiana dos estudantes? De fato, é provável que a Física Clássica, especialmente a Mecânica, ofereça um cenário favorável a um primeiro contato com Física, por possibilitar uma relação imediata entre a abstração de conceitos, as formulações matemáticas, e o senso-comum. No entanto, a educação científica não pode se limitar a isso, sob o risco de causar no(a) estudante a impressão de que a apreensão racional dos fenômenos é um mero academicismo, que não faz mais do que apenas formalizar (e complicar) o óbvio. É fundamental que, em um momento posterior, a habilidade compreensiva seja estendida para além do senso-comum, rumo à capacidade de construir analogias e compreender seus regimes de validade, de modo a conseguir prever o comportamento qualitativo de um sistema físico sem precisar mergulhar em longos cálculos.

Com esse viés em mente, um dos objetivos do presente trabalho é apresentar para o leitor, principalmente o professor de Física da educação básica, que a Física de Partículas *não é* um terreno árido no qual se é *proibido* enveredar sem um ferramental matemático absurdamente elaborado — embora, claro, ferramentas e técnicas apropriadas possibilitem avanços mais aprofundados e mais rápidos. Além disso, esperamos apresentar como a sequência didática ainda foi capaz de revelar diversos indícios de alfabetização científica e de engajamento por parte dos estudantes.

A pesquisa foi desenvolvida a partir de intervenções realizadas em parceria com o projeto de extensão “Universo na Escola” [Universo na Escola, Cosmo-UFES], do núcleo Cosmo-UFES, da Universidade Federal do Espírito Santo. As intervenções foram

ministradas por um, na época, pesquisador pós-doutorando do grupo Cosmo-UFES, a um grupo de quatorze estudantes do Centro Estadual de Ensino Médio em Tempo Integral (CEEMTI) Profa. Maura Abaurre, no município de Vila Velha, no estado do Espírito Santo. A fim de preservar o sigilo dos sujeitos participantes, ao longo deste trabalho nos referimos ao professor como “professor” ou “docente” e utilizamos nomes fictícios para os estudantes, que fazem referência à cientistas que atuaram na área da Física de Partículas.

O percurso metodológico de pesquisa possuiu cunho qualitativo e caráter de estudo de caso. A partir de indicadores presentes na literatura, buscamos, em primeiro lugar, indícios de alfabetização científica e de compreensão por parte dos estudantes dos conceitos-chave da Física de Partículas, bem como de suas relações com tecnologia, sociedade e meio-ambiente. Em segundo lugar, analisamos indicadores de engajamento revelados durante as aulas e as atividades realizadas pelos estudantes.

## A estrutura deste trabalho

O trabalho é organizado em três capítulos. O primeiro capítulo refere-se ao referencial teórico básico sobre alfabetização científica, dando destaque para sua relação com o enfoque CTSA, e engajamento. Este capítulo alicerça a metodologia e a análise das intervenções, que compõem os capítulos 2 e 3, respectivamente.

Mais especificamente, no capítulo 2, exploramos os objetivos da pesquisa e seu contexto, apresentando o local, os sujeitos participantes, e apresentamos uma proposta de sequência didática para explorar a temática de Física de Partículas. Neste capítulo, também apresentamos como foi realizada a coleta de dados e a metodologia adotada para analisá-los, estipulando os indicadores de alfabetização científica e de engajamento que usaremos em nossa análise.

No capítulo 3, utilizamos o referencial teórico e o percurso metodológico apresentados nos capítulos anteriores como bases para analisar as intervenções em si. Neste capítulo também damos destaque às considerações dos estudantes e do professor responsável pelas intervenções da proposta didática. Nossos resultados sobre os indícios de alfabetização científica e de engajamento por parte dos estudantes também são discutidos, à luz dos indicadores elaborados no capítulo 2.

No final do trabalho, apresentamos as considerações finais da pesquisa. Neste momento, também incorporamos nossas reflexões a respeito da viabilidade, da efetividade e das potencialidades de aplicação da sequência didática sobre Física de Partículas aqui proposta, bem como sobre as limitações de nosso estudo e as implicações de nossos resultados para futuras investigações e para o contexto das salas de aula.

# 1 Fundamentação teórica

## 1.1 A alfabetização científica

Em sua concepção sobre alfabetização, Paulo Freire propõe que ela deve buscar o desenvolvimento da capacidade de pensamento lógico dos educandos, de tal maneira que auxilie na passagem de uma consciência ingênua para uma consciência crítica [FREIRE, 2000]. Dessa forma, o(a) alfabetizado(a) estabelece mais conexões entre o mundo que o(a) cerca e a palavra escrita [FREIRE, 1989].

No caso da alfabetização científica e não da palavra escrita em si, entende-se que aquele(a) alfabetizado(a) cientificamente deve compreender as relações entre Ciência, Tecnologia, Sociedade e Meio-Ambiente; compreender a natureza da Ciência; compreender a ética que envolve o trabalho de um(a) cientista; e possuir conhecimentos básicos sobre as ciências. Do primeiro ponto, torna-se evidente o enfoque CTSA (Ciência-Tecnologia-Sociedade-Ambiente) de uma educação voltada à alfabetização científica [SASSERON; CARVALHO, 2011].

O contexto inicial de estudos contemplando o enfoque CTSA foi o do pós-guerra, em que questões ambientais, éticas, políticas e sobre a qualidade de vida da sociedade passaram a ser questionadas por intelectuais acadêmicos e por movimentos sociais [WAKS, 1990]. A população passou a confrontar uma elite que detinha o conhecimento científico e não incorporava todos os cidadãos nas tomadas de decisões que cabiam também a eles. De acordo com BYBEE [1987], um currículo com enfoque<sup>1</sup> CTS contempla a apresentação e a inclusão de habilidades e conhecimentos científicos e tecnológicos em um contexto pessoal e social, além de incluir processos investigativos que facilitem a tomada de decisões. Há que se promover uma integração do conteúdo científico e tecnológico com a discussão de seus aspectos históricos, éticos, políticos, sociais e econômicos [LOPES; CEREZO, 1996]. De acordo com Layton (1994), citado por SANTOS; MORTIMER [2002], o desenvolvimento de currículos com enfoque CTSA foi desenvolvido inicialmente nos países industrializados, na Europa e nos Estados Unidos, que viam necessidade de educar cientificamente e tecnologicamente suas populações. No contexto brasileiro, inovações educacionais com a incorporação de uma visão CTSA no ambiente escolar ocorreram desde 1950 [KRASILCHIK, 1987]. Perspectivas mais recentes no ensino de Ciências que incorporam o enfoque CTSA no Brasil são apresentadas nos trabalhos de SANTOS; MORTIMER [2001, 2002].

Nas palavras de SASSERON; CARVALHO [2008], a alfabetização científica se

---

<sup>1</sup> Na época do estudo de Bybee (1987), os pesquisadores da área utilizavam apenas a sigla CTS e não a sigla CTSA. No entanto, o Meio-Ambiente era incorporado de maneira implícita nos trabalhos, embora, de fato, com um menor destaque.

alicerça em três eixos estruturantes:

- i) a compreensão básica de termos, conhecimentos e conceitos científicos fundamentais,
- ii) a compreensão da natureza das ciências e dos fatores éticos e políticos que circundam sua prática,
- iii) o entendimento das relações existentes entre ciência, tecnologia, sociedade e meio-ambiente.

A alfabetização científica deve ser compreendida como um processo sempre em construção, englobando novos conhecimentos a partir da análise e ocorrência de novas situações [SASSERON, 2015].

Da mesma forma que expunha Freire com relação à alfabetização da escrita, os alfabetizados cientificamente também devem utilizar esses conhecimentos para ler o mundo, entender suas necessidades e transformá-lo [CHASSOT, 2000, 2003; GIL; VILCHES, 2001], a partir de atividades dialógicas [FREIRE, 2016]. Tais atividades devem favorecer o desenvolvimento das capacidades de observação, reflexão, criação, discriminação de valores, julgamento, comunicação, convívio, cooperação, decisão e ação, colaborando assim para a vida em comunidade [FRACALANZA *et al.*, 1987].

Há uma discussão na literatura sobre o termo “alfabetização científica”. De acordo com SASSERON; CARVALHO [2011], autores de língua espanhola utilizam a expressão “Alfabetización Científica” para designar o ensino que visa promover capacidades e competências entre os estudantes para participar de decisões do dia a dia. Nas publicações em francês, também é utilizado o termo “Alphabétisation Scientifique”. Já em publicações de língua inglesa, o ensino com o mesmo objetivo é chamado de “Scientific Literacy”. Este termo foi cunhado nos anos 1950 por Paul Hurd [HURD, 1958], embora tenha sido mais utilizado após o trabalho de SHAMOS [1995], no final do século passado. No trabalho de LAUGKSCH [2000], ele enfatiza como o conceito de “Scientific Literacy” é controverso e discute os vários fatores que influenciam as diferentes interpretações sobre o termo: os grupos de interesse, as diferentes concepções, a natureza relativa ou absoluta sobre o termo como um conceito, os diferentes propósitos para a defesa da “scientific literacy”, e as diferentes maneiras de mensurá-lo.

Além dos diversos termos e interpretações nos idiomas originais de pesquisas ao redor do mundo, pesquisadores de língua portuguesa utilizam diversas traduções, como “letramento científico”, “alfabetização científica” e até mesmo “enculturação científica”. Apesar dessas diferenças nos termos adotados e/ou traduzidos, bem como nas suas interpretações, buscamos alicerçar nossa pesquisa na ideia de alfabetização de Paulo Freire. Por isso, optamos por utilizar o termo “alfabetização científica”.

Dessa forma, consideramos os três eixos estruturantes acima para pensarmos sobre

a alfabetização científica nesse trabalho. Eles se assemelham às categorias de conhecimentos presentes em um dos primeiros trabalhos que formalizou as bases da “scientific literacy” [PELLA; O’HEARN; GALE, 1996]: relações entre Ciência e sociedade, ética no trabalho de um(a) cientista, natureza da Ciência, diferença entre Ciência e tecnologia, conceitos científicos básicos, relações entre Ciência e a área das Humanas.

Essas categorias também estão presentes nos trabalhos de diversos outros autores pioneiros sobre o assunto. Por exemplo, no trabalho de SHEN [1975], as atividades relacionadas à “scientific literacy” são divididas em: práticas, cívicas e culturais. A primeira delas engloba atividades de aquisição de informação científica que capacite na resolução de problemas práticos, de saúde e de sobrevivência. A segunda permite que qualquer cidadão e seus representantes se tornem mais conscientes sobre as implicações relacionadas às Ciências, para participarem de maneira mais abrangente do processo democrático em uma sociedade cada vez mais tecnológica, evitando o senso comum e a adoção de medidas possivelmente danosas à sociedade sobre temáticas como saúde, energia, alimentação, ambiente, entre outras. A terceira categoria engloba atividades que potencialmente despertam o desejo por conhecer a Ciência como uma produção humana, suas premissas, suas conclusões, suas formas de pensar, que podem, inclusive, serem abordadas por meio de ferramentas de popularização da Ciência.

No capítulo seguinte, sobre a metodologia adotada nessa pesquisa, e especificamente na seção 2.6.1, que aborda a metodologia da coleta de dados, apresentamos uma discussão aprofundada sobre possíveis indicadores de alfabetização científica, incorporando também outros elementos que auxiliam na caracterização dos mesmos. Essa discussão nos permitirá avaliar o processo de alfabetização científica, identificando alguns de seus indícios apresentados pelos estudantes ao longo do aplicação da sequência proposta nesse trabalho.

## 1.2 Engajamento

O engajamento escolar possui uma natureza multifacetada. É fruto da complexa interação social do sujeito com o ambiente escolar no qual ele está inserido, as situações que ele presencia e os outros sujeitos desse espaço. Engloba todo um processamento psicológico do sujeito com relação aos estímulos e quaisquer modificações que alterem esse ambiente e suas experiências no mesmo. Dessa maneira, um engajamento positivo por parte dos estudantes está diretamente ligado à existência de estímulos e situações de aprendizagem favoráveis ao seu desenvolvimento. Caso contrário, perceberemos estudantes com baixo nível de engajamento ou até mesmo nenhum indício de qualquer tipo de engajamento.

Na literatura, encontramos três tipos de engajamento: i) o engajamento comportamental, ii) o engajamento emocional e iii) o engajamento cognitivo [FREDERICKS;

BLUMENFELD; PARIS, 2004; COELHO, 2011; BORGES; JÚLIO; COELHO, 2005; SASSERON; SOUZA, 2019; FARIA; VAZ, 2019].

O engajamento comportamental diz respeito à participação dos estudantes durante as aulas e atividades em sala, bem como nas atividades para casa, ou extra-curriculares, seja demonstrando concentração e atenção, ou também fazendo perguntas e contribuindo para as discussões em sala de aula. Alguns autores descrevem que esse tipo de engajamento engloba também a participação em atividades esportivas escolares e/ou atividades relacionadas à liderança escolar [FINN, 1993; FINN; PANNOZZO; VOELKL, 1995; FINN; ROCK, 1997]. Esses mesmos autores também sugerem que o engajamento comportamental se refere a uma conduta positiva para seguir regras e aderir às normas escolares, com frequência comprovada nas aulas e a ausência de envolvimento em casos considerados indisciplinados. Relatam ainda que este tipo de engajamento é crucial para definir o sucesso acadêmico ou o abandono escolar.

O engajamento emocional incorpora as reações positivas e/ou negativas dos estudantes com relação ao docente e seus colegas de classe, bem como ao ambiente escolar de uma maneira geral, de tal modo que favoreça ou não a criação de laços que estimulam a vontade de se aprimorarem enquanto discentes e cidadãos. Alguns autores descrevem esse tipo de engajamento como uma sensação de pertencimento à escola, com a qual o estudante enxerga sua valorização no ambiente escolar [FINN, 1989; VOELKL, 1997]. Este tipo de engajamento está diretamente ligado aos interesses, valores e emoções dos estudantes. Cabe ressaltar que o engajamento emocional é distinto de motivação. Enquanto a motivação está relacionada a interesses ocasionais direcionados a uma certa atividade ou situação, que é fortalecida quando se tem interesse pessoal nelas, o engajamento emocional é mais dinâmico. Isso se deve ao fato de que, muitas vezes, não é possível identificar diretamente uma relação de reação emocional a um determinado domínio ou atividade.

O engajamento cognitivo demonstra a capacidade de fazer esforços para compreender ideias complexas e dominar habilidades mais elaboradas, através de um desejo em ir além dos requerimentos mínimos, com o qual o(a) estudante sente-se desafiado(a) mesmo vivenciando dificuldades em completar tarefas mais elaboradas. Estudantes que demonstram esse tipo de engajamento podem utilizar estratégias para conectar ideias e controlar seus esforços, seja porque estão motivados a realmente aprender ou apenas para obter boas notas. Este tipo de engajamento está intrinsecamente relacionado aos objetivos motivacionais dos estudantes, às suas capacidades autodidatas e de elaboração de estratégias.

Esses três tipos de engajamento se relacionam de forma dinâmica nos indivíduos e não podem ser pensados como processos isolados. Existem diferenças qualitativas para cada um desses tipos, proporcionando assim uma enorme gama de variações de intensidade e duração, culminando em uma multiplicidade de possibilidades para a identificação de

indícios de engajamento.

Compreender o engajamento como multifacetado auxilia não só na compreensão das experiências escolares, mas também na elaboração de atividades mais estimulantes no ambiente escolar que favoreçam a aprendizagem por parte dos estudantes.

A literatura apresentada acima compõe a base para a elaboração de indicadores que sejam capazes de avaliar o nível de engajamento dos estudantes ao longo da sequência didática proposta e discutida nesse trabalho, durante as atividades desenvolvidas em sala e as atividades propostas para casa. Os indicadores são elaborados no capítulo seguinte sobre a metodologia adotada nessa pesquisa, especificamente na seção [2.6.2](#), que aborda a metodologia da coleta de dados.



## 2 Metodologia

### 2.1 Objetivos

#### 2.1.1 Objetivo geral

Analisar a mediação pedagógica no desenvolvimento de uma sequência didática sobre Física de Partículas visando a alfabetização científica e o engajamento de estudantes do ensino médio.

#### 2.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a compreensão dos conceitos-chave da Física de Partículas, e de sua relação com Tecnologia, Sociedade e Meio-Ambiente.
- Identificar os indícios de alfabetização científica revelados pelos estudantes durante a intervenção pedagógica.
- Analisar os níveis de engajamento apresentados pelos estudantes ao longo da intervenção pedagógica.

### 2.2 O contexto da pesquisa: o local e os sujeitos

O Núcleo Cosmo-UFES, da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), iniciou, no ano de 2017, um projeto de extensão denominado “Universo na Escola” [[Universo na Escola, Cosmo-UFES](#)], em que professores e pesquisadores da Universidade são convidados a ministrar palestras a estudantes do ensino médio da rede pública estadual. As palestras versam sobre tópicos atuais de pesquisa em Física, visando complementar a formação desses estudantes e despertar-lhes o interesse pela pesquisa científica em geral e, particularmente, pela Física. Elas são elaboradas como atividade complementar eletiva nas escolas participantes e realizadas após o período regular de aulas, de modo a não prejudicar o planejamento escolar diário dessas escolas.

A pesquisa foi desenvolvida a partir de uma sequência didática elaborada em parceria com esse projeto de extensão, do qual participo. Cabe ressaltar que, para este trabalho, a sequência didática foi elaborada em formato de aulas e não se deu no formato usual de palestras como, geralmente, ocorre na perspectiva do projeto de extensão. As intervenções foram ministradas, na época, por um pesquisador pós-doutorando da UFES com o qual tenho amplo contato.

A sequência sobre Física de Partículas, em análise neste trabalho, foi aplicada a um grupo de quatorze estudantes do Centro Estadual de Ensino Médio em Tempo Integral (CEEMTI) Prof<sup>a</sup> Maura Abaurre, no município de Vila Velha, no estado do Espírito Santo. A organização local foi realizada pelo professor-coordenador da área de Física na escola. Os estudantes compunham uma turma mista de estudantes das 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> séries do ensino médio. Vários já integravam um grupo de interesse em Física formado pelo professor-coordenador da escola.

Cabe ressaltar que o número de estudantes presentes nas aulas foi variado. Em nenhuma aula tivemos a presença dos quatorze alunos no total, mas isso ocorreu devido ao próprio modo como as intervenções foram aplicadas. Como os dias de desenvolvimento das aulas variavam durante a semana de acordo com a disponibilidade da escola e do professor-coordenador na escola, alguns estudantes não puderam comparecer em todas as datas marcadas para as intervenções. Além disso, através de relato do próprio professor-coordenador da escola, alguns estudantes não puderam comparecer em todas as datas devido a conflito de horário com outras atividades, bem como devido a problemas familiares que privavam esses estudantes de, inclusive, frequentarem a escola durante todo o dia e não apenas as aulas destinadas às intervenções que realizamos.

Os encontros na escola tiveram duração aproximada de uma hora em aulas extra-classe durante os meses de Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro de 2019, totalizando uma carga horária de 10 horas de atividades de Física de Partículas desenvolvidas com os estudantes. Cabe ressaltar que os estudantes não tinham qualquer obrigação curricular de frequentar as aulas das intervenções, mas estas faziam parte de uma atividade voluntária, ou seja, os estudantes eram livres para participar ou não das aulas.

## 2.3 A organização das intervenções e atividades

As atividades desenvolvidas em sala de aula e as atividades propostas para casa foram diversas. Iniciamos a sequência didática com uma discussão dialógica sobre a grande temática de Física de Partículas, em que realizamos o levantamento dos conhecimentos prévios dos estudantes sobre essa área da Física e abrimos espaço para uma conversa sobre alguns de seus fenômenos e aplicações tecnológicas. Os conhecimentos prévios dos estudantes sobre a estrutura atômica da matéria foram considerados para iniciarmos o desenvolvimento da sequência.

De posse dos conhecimentos prévios dos estudantes, seguimos com uma discussão dialogada mais aprofundada sobre as interações gravitacional e eletromagnética, pois estas se mostraram mais familiares a eles. Buscamos estimular não somente a compreensão, pelos estudantes, de termos e conceitos, mas também proporcionar-lhes oportunidades de trabalhar o conhecimento sobre o pensamento científico e aplicações tecnológicas das

épocas. Exploramos também relações de alguns conceitos com outras áreas científicas, como a Biologia e a Química, e também trabalhamos o desenvolvimento da linguagem de gráficos com os estudantes.

Partimos então para uma discussão também dialógica sobre a Física Nuclear, em que abordamos fatores sociais, éticos e políticos e até questões ambientais em sala de aula.

Elaboramos também atividades para casa, em forma de produção textual, a fim de avaliar a compreensão e o engajamento dos estudantes com os tópicos até então trabalhados, dando oportunidades aos estudantes de se expressarem também em outras formas que não apenas a oral.

Seguimos a sequência trabalhando com tópicos relacionados às interações forte e fraca, em que propusemos atividades semelhantes às descritas acima. Além dessas atividades, propusemos também que os próprios estudantes desenvolvessem pesquisas sobre alguns tópicos relacionados à Física de Partículas e os apresentassem em sala para toda a turma, estimulando-os ao caráter exploratório da pesquisa científica e à participação em atividades relacionadas ao trabalho de um(a) cientista, como a elaboração de apresentações sobre suas próprias investigações.

Cabe ressaltar que em todas as aulas, exceto na última, o professor utilizou os seguintes materiais didáticos: pincel, lousa, slides com imagens explicativas e frases curtas de resumo das principais ideias discutidas, vídeos da internet e simulações educativas. Alguns desses receberão menções durante a apresentação da sequência didática na seção 2.5. Na última aula, dedicada à apresentação dos estudantes, estes utilizaram principalmente a exposição oral sobre suas investigações, além de pincel e lousa.

## 2.4 Coleta de dados

A coleta de dados ocorreu a partir de observações que realizei durante as aulas, além de relatos pessoais oral e escrito obtidos diretamente com o professor responsável pelas aulas da sequência e de conversas com os estudantes participantes em momentos extras, fora do horário das aulas da sequência mas que as antecederam ou sucediam. Avaliamos os indicadores de alfabetização científica presentes no decorrer das aulas, bem como as alterações nos níveis de engajamento demonstrados pelos estudantes. Também tomamos notas sobre as interações entre os discentes, seus níveis de interesse e de atenção durante as aulas, as perguntas realizadas por eles e demais reações julgadas relevantes à análise.

Os dados desta pesquisa se baseiam no diário de campo elaborado durante e após as aulas, que serviu não só como um dispositivo de registro das falas dos alunos e do professor, das relações e interlocuções ocorridas em sala de aula e nos momentos extra de conversas com os alunos e com o professor, mas também dos aspectos descritivos dos sujeitos envolvidos, dos objetos, do espaço, das atividades e dos acontecimentos [OLIVEIRA, 2014;

LÜDKE; ANDRÉ, 1986]. Enfim, ele abarcou todas as observações que considerei relevantes sobre o que vi e ouvi, bem como as minhas próprias reflexões sobre tais observações. Com relação aos aspectos descritivos, considerei minha percepção sobre as aparências dos sujeitos e seu modos de falar e agir, os momentos e diálogos mais relevantes em sala de aula, a descrição de acontecimentos particulares – como as falas de alunos em momentos que antecederiam ou sucediam as próprias aulas – e das atividades realizadas em sala, e a incidência dos indicadores de alfabetização científica e de engajamento. Com relação aos aspectos reflexivos das anotações que compuseram o diário, os registros se direcionaram à reflexão sobre o porquê das incidências desses indicadores nos momentos em que emergiram, bem como à reflexão sobre a compreensão dos conceitos-chave em Física de Partículas por parte dos alunos, possíveis conexões entre essas reflexões e suas relações com o caráter menos expositivo das aulas da sequência e da presença dos alunos nelas.

Cabe ressaltar que também tivemos acesso às produções escritas das atividades para casa realizadas pelos estudantes, bem como acesso às apresentações de suas pesquisas, realizadas na última aula da sequência. Portanto, essas atividades também compõem os dados a serem analisados no capítulo 3. Obtivemos autorização da Secretaria da Educação (SEDU) do Estado do Espírito Santo e da diretoria da escola para coletar os dados referentes a todos os aspectos mencionados acima.

## 2.5 Uma proposta de sequência didática sobre Física de Partículas

A seguir apresentamos uma proposta de sequência didática sobre Física de Partículas, evidenciando os momentos elaborados para cada uma das aulas da sequência e mencionando como eles ocorreram, especificamente, durante as nossas intervenções. Cabe ressaltar que não apresentaremos aqui as imagens, e quadros das animações e vídeos utilizados, mas pretendemos publicar uma série de artigos com esse material detalhado, incluindo também explicações didáticas sobre a temática para servir de referência para professores e alunos. Também não pretendemos realizar qualquer tipo de análise sobre os momentos nesta seção, nem avaliar os indicadores de alfabetização científica e de engajamento correspondentes. Tal análise detalhada só ocorrerá no capítulo 3, já de posse da metodologia para a análise de dados a ser apresentada na seção 2.6.

### 2.5.1 Aulas 1, 2 e 3: Conhecimentos prévios e as interações eletromagnética (QED) e gravitacional

As primeiras três aulas da sequência tiveram como foco a interação gravitacional, de maneira breve, e a Eletrodinâmica Quântica (QED, sigla em inglês para *Quantum Electrodynamics*), a teoria quântica da interação eletromagnética. Construímos uma sequência que, em nosso julgamento, percorreu um caminho acessível aos estudantes, partindo de

seus conhecimentos prévios sobre a estrutura atômica da matéria, passando pelos elétrons (protagonistas da QED) e a interação eletromagnética, ondas eletromagnéticas (e aplicações interdisciplinares), a dualidade onda-partícula e os fótons, culminando na descrição fundamental da QED em que a interação entre cargas elétricas é mediada pela troca de fótons. A interação gravitacional foi discutida em termos de suas semelhanças e diferenças com relação à interação eletromagnética. Isso ocorreu pois o caminho construído em nossa sequência utilizou como base a interação eletromagnética como a mais simples interação conhecida. Ela é mais familiar e utilizada no dia a dia dos estudantes e é mais bem desenvolvida também em termos puramente teóricos e formais, pois ainda não possuímos uma teoria quântica da gravitação. Portanto, ainda que a interação gravitacional tenha sido descoberta antes da interação eletromagnética, nosso conhecimento sobre a primeira não é tão amplo quando comparado ao conhecimento desta última.

Mencionamos a seguir os momentos didáticos que exploramos em sala de aula dentro do contexto da QED e da interação gravitacional.

O objeto de estudo da Física de Partículas é a matéria em seu nível mais elementar, precedendo a formação de estruturas compostas mais complexas. Ou seja, é o estudo dos constituintes fundamentais da matéria e de suas interações mútuas. A temática é convidativa, portanto, a uma discussão inicial que desemboque na teoria atômica e na natureza discreta da matéria.

Em um primeiro momento, mais importante do que explicar as nuances dos diversos modelos atômicos, é preciso que fique claro aos discentes a gênese do conceito de átomo, as diferenças entre a concepção grega, moderna e contemporânea desse termo, e, principalmente, as evidências empíricas em favor do atomismo. Não basta que a ideia de átomo seja aceita, é preciso que o(a) estudante saiba convencer outrem de que a hipótese atomista resulta em uma excelente descrição do comportamento da matéria. Ademais, seria interessante propor uma discussão sobre as evidências que corroboram essa hipótese, levantando um debate salutar sobre epistemologia e ciência, sobre as condições para que uma hipótese seja “validada” pela comunidade científica.

Portanto, a primeira aula, de título “Introdução à Física de Partículas”, se iniciou com uma busca pelos conhecimentos prévios dos estudantes sobre Física de Partículas, em que o professor fez perguntas como “*Alguém tem alguma ideia do que seja Física de Partículas?*”, “*De quais partículas estamos falando?*” e “*Por que a gente sabe que a matéria é composta por átomos?*”, entre outras, dependendo das respostas e interações que surgiam. Esta última pergunta suscitou uma breve discussão sobre o funcionamento da Ciência. Como ela se baseia em uma série de evidências que, constantemente, aprimoram o nosso conhecimento sobre o mundo, e perpassou ainda uma breve discussão sobre o movimento terraplanista, que tem ganhado diversos adeptos ao redor do mundo utilizando meios de convencimento, que são distintos dos meios usuais em uma exploração científica.

De fato, esse movimento tem, através do dogmatismo, explorado o negacionismo científico.

Após essa breve discussão, o professor apresentou o Modelo Padrão da Física de Partículas como o melhor modelo que temos, até o momento, para explicar fenômenos relacionados à matéria e suas interações, ao que se seguiu um breve comentário sobre alguns desses fenômenos, como a luz, a energia solar, a radioatividade, a energia nuclear, bem como aplicações na Medicina e aplicações tecnológicas.

A aula continuou com o professor mediando uma discussão entre os estudantes sobre suas ideias de subestruturas do átomo, com exposição por parte de alguns alunos sobre a ideia dos quatro elementos da antiguidade grega. O professor sistematizou esses conhecimentos levantados fazendo referência ao embate que ocorreu nessa mesma época entre o contínuo e o vácuo, o que culminou na hipótese atomista. Uma primeira evidência para essa hipótese foi apresentada, com a utilização de um vídeo demonstrativo sobre a eletrólise da água e as reações químicas [MILAM, 2016]. Seguiu-se uma referência à discussão inicial sobre o funcionamento da Ciência aplicada a essa evidência específica. Depois foram discutidas ainda outras duas evidências para sustentar a hipótese atomista, a lei dos gases e o movimento browniano.

Outros exemplos poderiam ser apresentados, mas o importante é enfatizar que não é necessário enxergarmos os átomos para saber que existem (embora isso já seja possível com microscópios eletrônicos). Ao supormos que a matéria é assim constituída, podemos deduzir suas propriedades e prever corretamente seu comportamento, cumprindo com uma das principais funções da Ciência como atividade humana: incrementar nossa capacidade de controle sobre as forças naturais ao mesmo tempo em que podemos melhor estimar seu impacto social.

Uma vez que se tenha consolidado a concepção de estrutura atômica da matéria, pode-se partir para o rompimento da ideia de que o átomo é indivisível. Aqui começa a Física de Partículas de fato: introduz-se a primeira partícula elementar, protagonista da Eletrodinâmica Quântica, o elétron. Uma maneira de se introduzir partículas subatômicas é discutir o experimento de (Joseph) Thomson com tubos de raios catódicos. Para uma sequência didática investigativa explorando essa temática vide ref. [CARDOSO, 2016]. Adotamos essa ideia e o momento seguinte da aula foi de uma conversa sobre as ideias dos estudantes sobre a divisibilidade ou a indivisibilidade do átomo, culminando na apresentação do experimento de Thomson através de imagens explicativas e na discussão sobre a descoberta do elétron e suas características.

A Física de Partículas versa não somente sobre os constituintes fundamentais da matéria, mas também sobre o modo como essas partículas interagem entre si, e como essas interações microscópicas dão origem à Física macroscópica que observamos cotidianamente.

Dentre as interações fundamentais da matéria, a interação eletromagnética se destaca por ser a mais simples de todas, e também pela sua ubiquidade em nosso cotidiano:

além das inúmeras aplicações tecnológicas, todas as “forças de contato” que experimentamos têm origem eletromagnética.

O eletromagnetismo já é um tópico pertencente ao currículo usual de Física no ensino médio, de modo que a discussão apresentada aqui não foge à temática que já seria tratada em algum momento pelo(a) docente em sala de aula. Entretanto, a apresentação do tópico sob uma perspectiva motivada pela Física de Partículas tem certas vantagens, por possibilitar uma melhor compreensão sobre o comportamento dessa interação, além de naturalmente induzir a uma sequência didática que promove uma conexão natural entre Física Clássica e Moderna.

Dessa forma, a lei de (Charles de) Coulomb foi apresentada, e ocorreu uma discussão sobre suas semelhanças e suas diferenças com relação à lei da Gravitação Universal de (Isaac) Newton, culminando na conversa sobre o porquê de a nossa percepção da força gravitacional ser mais aguçada do que a da força elétrica, embora a primeira seja mais fraca do que a segunda.

A primeira aula consistiu em 16 momentos, que identificamos na tabela 1.

<b>Aula 1: Introdução à Física de Partículas</b>	
1	A busca pelos conhecimentos prévios
2	O funcionamento da Ciência: parte I
3	Apresentação do Modelo Padrão da Física de Partículas
4	A luz e outros fenômenos explicados pelo Modelo Padrão
5	Subestruturas do átomo e os quatro elementos
6	O contínuo e o vácuo: um embate entre duas ideias
7	A hipótese atomista: a eletrólise da água e as reações químicas
8	O funcionamento da Ciência: parte II
9	A hipótese atomista: a lei dos gases
10	A hipótese atomista: o movimento browniano
11	A divisibilidade do átomo
12	O experimento de Thomson e a descoberta do elétron
13	Atração e repulsão entre elétrons
14	A lei de Coulomb e suas semelhanças com a lei da Gravitação Universal de Newton
15	A lei de Coulomb e suas diferenças com a lei da Gravitação Universal de Newton
16	Por que percebemos mais a força gravitacional e não a força elétrica?

Tabela 1 – Os momentos da primeira aula da sequência.

A segunda aula, de título “A natureza da luz – Parte I”, começou com uma recapitulação da aula anterior, para perceber quais aspectos foram bem trabalhados ou não a partir das perspectivas dos próprios estudantes, que ficaram à vontade para expressarem suas ideias e questionamentos sobre a aula anterior.

Em seguida, tendo em vista que os estudantes finalizaram esse primeiro momento comentando sobre os aspectos das interações gravitacional e eletromagnética, o professor

aproveitou para estimular uma discussão sobre como essas duas interações são responsáveis pela maioria dos fenômenos no nosso dia a dia. Esse momento finalizou com a noção de ação à distância para a interação eletromagnética.

O fato de o eletromagnetismo ser uma interação à distância suscita questões importantes: como partículas distantes sabem do comportamento das demais para reagirem de maneira a satisfazer as leis da eletrodinâmica? Como um elétron no receptor de um celular sabe que existem elétrons se movendo na antena emissora do sinal? Essa problemática tem relação direta com aplicações tecnológicas que permeiam o cotidiano dos(as) estudantes, que podem (e devem) ser usadas como motivação para essa aula. Perguntas do tipo “Como os telefones celulares enviam e recebem mensagens?” ou “Como funcionam tecnologias *wireless*?” podem servir como problema inicial em uma aula investigativa.

A discussão pode ser então guiada a uma ênfase no papel do campo eletromagnético enquanto mediador da interação e, mais importante, enquanto ente físico com dinâmica própria. As conclusões centrais que devem ser atingidas pelos estudantes são: (i) a existência de uma carga elétrica causa um campo eletromagnético; (ii) caso o estado de movimento da carga seja alterado, o campo é modificado em seu entorno imediato, e essa modificação se propaga como uma onda; (iii) quando a onda atinge uma outra carga, transfere-lhe energia e momento, alterando seu estado de movimento, i.e. comunicando-lhe o movimento apropriado. Algumas simulações interativas visando auxiliar a compreensão desses efeitos podem ser encontradas em [[Irradiando Carga, PhET Simulações Interativas](#); [Cargas e Campos, PhET Simulações Interativas](#); [Ondas de Rádio e Campos Eletromagnéticos, PhET Simulações Interativas](#)]. A conclusão final da investigação é que a existência de radiação eletromagnética garante que a causalidade seja preservada pela interação.

O processo de emissão e recepção de ondas eletromagnéticas engloba, em uma só temática, todos os aspectos centrais da teoria eletromagnética. A etapa (i) oferece a oportunidade de se discutir a Lei de (Carl Friedrich) Gauss, a etapa (ii) possibilita discutir o fenômeno de indução de campos elétricos pela variação de campos magnéticos (e vice-versa), enquanto (iii) está associado à força de (Hendrik) Lorentz sobre uma carga.

Mais especificamente, pode-se apresentar as equações de (James) Maxwell de maneira intuitiva e acessível a estudantes de ensino médio, substituindo-se as expressões matemáticas, envolvendo derivadas e integrais, por suas interpretações físicas (cf. [FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS \[2008\]](#), Vol. II, Cap. 1).

Em nosso caso, houve uma busca pelos conhecimentos prévios sobre campo, e a a noção de campo elétrico foi introduzida. O professor aproveitou também para explicar como a lei de Coulomb possui dependência com o inverso do quadrado da distância entre duas cargas elétricas. Na primeira aula, esta lei foi apenas apresentada e seus aspectos foram explorados em comparação com a lei da Gravitação Universal de Newton. Já nesta segunda aula, a explicação sobre sua expressão matemática e outros aspectos particulares

à força elétrica foram abordados. Para isso, o professor utilizou o conceito de linhas de campo elétrico e fluxo de campo elétrico, e propôs que os estudantes discutissem como seria o comportamento do fluxo de campo elétrico através de uma superfície esférica, fazendo uma analogia com o fluxo de água que escoava pelas bordas de uma base circular usando, para isso, uma imagem de uma pequena bacia em um chafariz. Em seguida, o professor fez um breve comentário de que damos o nome de “lei de Gauss” à expressão que relaciona o fluxo do campo elétrico que perpassa uma superfície qualquer com a carga elétrica englobada por essa mesma superfície. O docente usou como exemplo o próprio exercício que os estudantes discutiram em sala para o caso de uma superfície esférica, bem como algumas simulações mencionadas acima [[Irradiando Carga](#), [PhET Simulações Interativas](#); [Cargas e Campos](#), [PhET Simulações Interativas](#)].

No momento seguinte, o professor propôs que os alunos pensassem onde entraria o magnetismo na discussão pois, tem-se falado em eletromagnetismo, mas até agora eles não tinham discutido nada que envolvesse o magnetismo em si. Após essa escuta das falas dos alunos, o docente introduziu a noção de que não existem cargas magnéticas tais como cargas elétricas e pediu que os alunos refletissem sobre como seria uma lei para o magnetismo, semelhante à lei de Gauss, tendo em vista que não existem cargas magnéticas. Houve um momento considerável de discussão sobre essa questão proposta e, quando os alunos chegaram na conclusão de que a lei seria ainda mais simples do que a de Gauss, o professor seguiu comentando que existiam ainda outras duas leis que, em conjunto com as leis de Gauss para o campo elétrico e magnético, complementariam a descrição total do eletromagnetismo. Além disso elas unificariam fenômenos elétricos e magnéticos, e pediu que os estudantes elaborassem suas expressões de maneira conceitual. As quatro equações são então sistematizadas como “as equações de Maxwell”.

Depois da noção unificada do eletromagnetismo, com a variação do campo elétrico gerando um campo magnético e vice-versa, houve uma ampla discussão sobre ondas eletromagnéticas. Não só simulações foram apresentadas e trabalhadas com os alunos, como a já mencionada simulação [Ondas de Rádio e Campos Eletromagnéticos](#) [[PhET Simulações Interativas](#)], mas também os próprios alunos buscaram compreender as aplicações das ondas eletromagnéticas, o que originou uma conversa sobre as características gerais de ondas e a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas. Essa conversa culminou na noção de que a luz é uma onda eletromagnética e, em seguida, aspectos sobre seu espectro foram discutidos. Para trazer um pouco mais a discussão do espectro eletromagnético para o cotidiano dos alunos, o professor abordou o exemplo do funcionamento de um microondas. Para finalizar a aula foram discutidos aspectos interdisciplinares com a Biologia, como a relação entre o espectro da luz emitida pelo Sol e a teoria da evolução de (Charles) Darwin aplicada ao olho humano ou à cor verde das plantas.

A segunda aula consistiu em 16 momentos, identificados na tabela 2.

<b>Aula 2: A natureza da luz – Parte I</b>	
1	Breve revisão da aula anterior
2	As interações gravitacional e eletromagnética: as bases para a maioria dos fenômenos no nosso dia a dia
3	Conhecimentos prévios sobre o conceito de campo
4	O campo elétrico e a explicação sobre a expressão da lei de Coulomb
5	Linhas de campo elétrico e a lei de Gauss
6	A inexistência de monopolos magnéticos
7	As equações de Maxwell e a unificação do eletromagnetismo
8	Ondas eletromagnéticas
9	Simulação com ondas eletromagnéticas
10	Aplicações de ondas eletromagnéticas
11	A luz é uma onda eletromagnética
12	O que é uma onda?
13	O espectro eletromagnético
14	Fazendo pipoca no microondas
15	A luz do Sol: a teoria da evolução de Darwin e o intervalo de frequência visível ao olho humano
16	A luz do Sol: a teoria da evolução de Darwin e por que as plantas são verdes?

Tabela 2 – Os momentos da segunda aula da sequência.

A discussão da temática de Ondas Eletromagnéticas abre a possibilidade de se adentrar em temas de Física Moderna, como a Teoria da Relatividade Restrita ou a Dualidade Onda-Partícula em Mecânica Quântica. Embora ambos sejam de suma importância para a Física de Partículas, nesta sequência didática focaremos no aspecto quântico visando a introdução do conceito de fóton. Para propostas didáticas visando o ensino de Relatividade no ensino médio vide refs. [GUERRA; BRAGA; REIS \[2007\]](#); [CAPELARI \[2016\]](#); [RABELO DE SÁ \[2015\]](#).

A terceira aula da sequência, “A natureza da luz – Parte II”, entrou em aspectos propriamente da Física de Partículas Contemporânea, com a discussão de tópicos mais avançados. Ela se iniciou da mesma forma que a segunda aula, com uma breve recapitulação da aula anterior, novamente para proporcionar que os alunos retomassem o que havia sido trabalhado nela e expusessem quaisquer questões pendentes e/ou novos pensamentos sobre os tópicos nela abordados.

Em seguida, se iniciou uma ampla discussão sobre conceitos e tópicos relevantes necessários para um melhor entendimento dos aspectos relacionados à Física de Partículas em si. Para isso, foi necessário introduzir alguns tópicos introdutórios de Mecânica Quântica. Essa discussão perpassou um debate inicial sobre o que caracteriza uma partícula ou uma onda, e como se dá a compreensão sobre entidades que se comportam ora como partícula, ora como onda, através da discussão sobre padrões de interferência usando vídeos, animações e imagens da reportagem [[SIEGEL, 2019](#)] como auxílio. Foi usado o caso da luz para a melhor compreensão desse conceito de onda-partícula, com a apresentação da partícula que

medeia a interação eletromagnética, o fóton. Em seguida, foi apresentado como o elétron também se comporta ora como onda, ora como partícula. Logo depois, o funcionamento do microscópio eletrônico foi apresentado em analogia com a discussão dos padrões de interferência para o caso da luz. A noção de trajetória foi discutida e estimulou-se um debate sobre como enxergamos o mundo ao nosso redor. A relação de (Louis) de Broglie, envolvendo grandezas que caracterizam ondas e partículas, foi apresentada de maneira conceitual, com um destaque sobre a constante de (Max) Planck e o papel das constantes fundamentais da Natureza na Física.

A introdução do conceito de fóton implica, em um primeiro momento, em uma ambiguidade na descrição da radiação eletromagnética, que passa a ser ao mesmo tempo tratada como oscilação de um campo clássico e como ente com propriedades quânticas<sup>1</sup>. Como o caráter quântico dos fótons poderia emergir da propagação de um campo clássico? Essa inconsistência aponta para a necessidade de se quantizar o campo eletromagnético, i.e. descrevê-lo inteiramente de acordo com o paradigma quântico.

A teoria quântica que descreve a interação entre partículas carregadas (por exemplo entre elétrons) e o campo eletromagnético quantizado é chamada de Eletrodinâmica Quântica. Então, após a discussão ampla sobre tópicos em Mecânica Quântica, a interação eletromagnética foi abordada como uma interação entre fótons, com o uso dos diagramas de (Richard) Feynman, que são capazes de fornecer uma visualização dos processos relacionados a essa interação de forma bastante intuitiva e clara. Por exemplo, a interação entre elétrons ocorre através do diagrama de Feynman como na figura 1. Não se deve ler o diagrama como se um dos elétrons tivesse emitido o fóton e o outro o tivesse absorvido: na verdade o diagrama representa a soma (i.e. a superposição quântica) de ambos os processos [HALZEN; MARTIN, 1984].

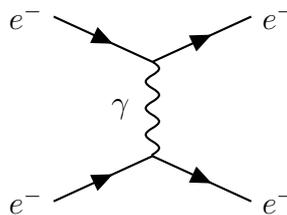


Figura 1 – Diagrama de Feynman ilustrando a interação entre dois elétrons mediada pela troca de um fóton.

Em uma teoria quântica relativística, o elétron é interpretado como uma excitação de um campo fundamental, que chamamos de “campo do elétron” ou “campo eletrônico”. Contudo, é possível mostrar que os postulados da relatividade restrita só são satisfeitos quando se considera que o campo eletrônico possui também um outro tipo de excitação,

<sup>1</sup> Note que essa ambiguidade não está associada à dualidade onda-partícula. O problema acima exposto diz respeito à impossibilidade de um mesmo objeto possuir um caráter clássico e quântico, simultaneamente. Já a dualidade onda-partícula é introduzida justamente como superação dos conceitos clássicos de “onda” e “partícula”, que não se aplicam a objetos quânticos.

com a mesma massa do elétron mas carga oposta. Em outras palavras, uma teoria quântica relativística do elétron prevê, também, a existência de um anti-elétron! Como a carga dessa partícula é positiva, ela é chamada de pósitron. A aula seguiu então com a apresentação dessa nova partícula: o pósitron. Suas características foram apresentadas, ao que seguiu um debate sobre como sua descoberta ocorreu após a previsão da teoria, mostrando a relevância desse poder preditivo de teorias científicas para avançar a Ciência. Seguiu-se um debate sobre como funciona a aniquilação entre partícula e antipartícula, apresentando também uma interpretação interessante sobre as antipartículas como partículas que viajam para o passado. Da maneira inversa, introduziu-se a criação de um par partícula-antipartícula, usando o caso do elétron-pósitron e discutindo o ocorrência desses processos considerando a relação massa-energia de (Albert) Einstein.

A figura 2 ilustra a criação de um par elétron-pósitron observada em uma câmara de bolhas. O experimento é desenhado para detectar o rastro de partículas carregadas, por isso o rastro do fóton não aparece, embora possa ser deduzido pelo vértice de criação do par. As partículas estão submetidas a um campo magnético perpendicular ao plano da figura, e, por possuírem mesma massa e cargas opostas, são curvadas em direções opostas, mas com trajetórias de aproximadamente mesmo raio.

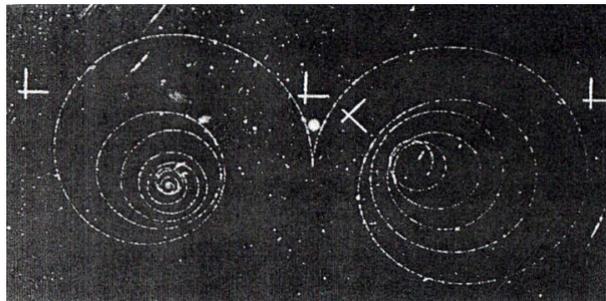


Figura 2 – Criação de um par elétron-pósitron visualizado em uma câmara de bolhas. Fonte: CERN.

Esse fenômeno de aniquilação de pares resultando em radiação eletromagnética tem aplicação prática na medicina, nos chamados *PET scans* (PET é sigla em inglês para Tomografia por Emissão de Pósitrons). Trata-se de uma modalidade de obtenção de imagens e dados sobre o funcionamento metabólico do organismo. No final da aula discutimos amplamente algumas aplicações e suas implicações, como o raio-X e a tomografia *PET-scan*.

A terceira aula consistiu em 17 momentos, identificados na tabela 3.

## 2.5.2 Aulas 4 e 5: Física Nuclear

O segundo bloco de aulas da sequência teve como foco a Física Nuclear. Este segundo bloco de aulas fluiu de maneira natural a partir do primeiro bloco de aulas. Buscou-se inicialmente ir além da descrição do átomo de Thomson, culminando na discussão do

<b>Aula 3: A natureza da luz – Parte II</b>	
1	Breve revisão da aula anterior
2	O que são partículas? O que são ondas?
3	A dualidade onda-partícula e o fóton
4	O fóton não tem massa
5	O elétron também é onda-partícula
6	O microscópio eletrônico
7	Existem trajetórias na Mecânica Quântica? Como enxergamos?
8	A relação de de Broglie e a constante de Planck
9	Constantes fundamentais da Natureza
10	Interação eletromagnética: troca de fótons e os diagramas de Feynman
11	O pósitron: a antipartícula do elétron prevista por Dirac
12	O poder preditivo de uma teoria científica
13	Aniquilação matéria-antimatéria
14	Uma interpretação para antipartículas: partículas que andam para trás no tempo
15	A criação de um par elétron-pósitron
16	A relação massa-energia de Einstein
17	O funcionamento do raio-X, da tomografia PET-scan e seus perigos

Tabela 3 – Os momentos da terceira aula da sequência.

átomo de (Ernest) Rutherford e das subestruturas do núcleo atômico: os prótons e os nêutrons. Diante dessa nova visão para o átomo, a introdução de uma nova interação da Natureza ocorreu de forma natural.

Neste bloco foi abordada a interação residual nuclear forte, que resulta da interação fundamental forte – tópico que será aprofundado no terceiro bloco de aulas da sequência –, pois julgamos ser esse um caminho mais motivador para os estudantes. Esse julgamento foi sustentado a partir da literatura apresentada na introdução deste trabalho. De fato, a literatura nos mostra que tópicos relacionados à Física Nuclear são alguns dos mais desejados de serem vistos em sala de aula pelos estudantes. Além disso, vários aspectos da Física Nuclear têm relação com o cotidiano dos estudantes. São eles: os processos de fusão e fissão, decaimentos nucleares, a energia do Sol, a energia nuclear (suas vantagens e desvantagens), a radioatividade, e questões políticas e éticas relacionadas ao uso da energia nuclear. As motivações para essa interação residual, bem como para sua partícula mediadora, também foram apresentadas em comparação com as motivações e partículas mediadoras já discutidas das interações gravitacional e eletromagnética.

A seguir mencionamos os momentos didáticos explorados em sala de aula dentro do contexto da Física Nuclear.

A quarta aula, “Física Nuclear – Parte I”, se iniciou com uma breve revisão da aula anterior, a fim de sistematizar os aspectos importantes das duas interações fundamentais da Natureza até então trabalhadas, as interações gravitacional e eletromagnética. Também foi lembrada a noção de antimatéria e como se dá sua relação com a matéria, usando o

caso do par elétron-pósitron. A dualidade onda-partícula foi lembrada para dar início a uma discussão sobre as escalas dos efeitos quânticos e relativísticos, usando a constante de Planck e a velocidade da luz para instigar os alunos sobre o porquê desses efeitos não serem visíveis em nosso dia a dia e o porquê da necessidade de usar altas energias na Física de Partículas.

No momento seguinte foi lembrado o átomo de Thomson, com o intuito de promover uma discussão sobre como ir além dessa descrição para o átomo, culminando na discussão em detalhes do experimento de Rutherford. Aqui também foram brevemente mencionados detalhes sobre como pesquisadores iniciantes na Física, e nas Ciências em geral, entram para um grupo de pesquisa e, geralmente, trabalham no desenvolvimento de projetos elaborados pelo líder desse grupo, um pesquisador mais experiente que dá ideias sobre novos projetos e auxilia os pesquisadores em estágios iniciais da carreira. Usamos aqui diretamente o caso de (Hans) Geiger e de (Ernest) Marsden, pesquisadores em estágio inicial de suas carreiras do grupo de pesquisa de Rutherford, que seguiram uma ideia de Rutherford e elaboraram o experimento que ficou conhecido como experimento de Rutherford. Aqui nos referimos a esse experimento como Rutherford-Geiger-Marsden. Usando esse experimento como pano de fundo, logo em seguida ocorreu uma breve discussão sobre teste de hipóteses na Ciência e seu desenvolvimento. O fato de esse experimento ter obtido partículas alfa, núcleos de hélio  $\text{He}^4$ , que desviavam em diversos ângulos quando interagem com uma lâmina de ouro indicava que a descrição do átomo de acordo com o modelo de Thomson era insatisfatória, pois esta última previa desvios apenas em pequenos ângulos. Assim introduziu-se a noção de como Rutherford levantou uma hipótese sobre uma nova descrição para o átomo e a testou, comparando os resultados para os desvios que sua hipótese previa com as observações experimentais.

A aula prosseguiu com a introdução das subestruturas do núcleo atômico, os prótons e os nêutrons, e uma discussão sobre o porquê de o núcleo não se desintegrar, tendo em vista que os prótons se repelem com suas cargas positivas e o nêutrons não possuem carga elétrica para contrabalancear essa repulsão. Dessa forma, a interação nuclear forte foi naturalmente motivada e foi dada uma continuidade da discussão sobre como a Ciência se desenvolve, com pequenos avanços pouco a pouco. Neste momento, usamos como exemplo a própria revolução sobre a constituição do átomo com os avanços de Rutherford que, logo em seguida, deu lugar a uma nova revolução através da noção de que o próprio núcleo atômico deveria possuir subestruturas.

Por fim, foram apresentadas as características dessa nova interação, comparando-a às interações gravitacional e eletromagnética e dando ênfase às partículas que medeiam essas interações: o pión para a interação nuclear forte, o gráviton para a interação gravitacional e o fóton para a interação eletromagnética.

A quarta aula consistiu em 10 momentos, que identificamos na tabela 4.

<b>Aula 4: Física Nuclear – Parte I</b>	
1	Breve revisão da aula anterior
2	As escalas dos efeitos quânticos e relativísticos
3	Relembrando o átomo de Thomson
4	O experimento de Rutherford-Geiger-Marsden: levantando hipóteses na Ciência
5	Teste de hipóteses na Ciência
6	Como ocorre o desenvolvimento da Ciência – Parte I
7	Os prótons e os nêutrons: o núcleo atômico possui uma subestrutura
8	A interação nuclear forte: porque o núcleo não se desintegra?
9	Como ocorre o desenvolvimento da Ciência – Parte II
10	Comparando a interação forte com as interações gravitacional e eletromagnética: o pión, o gráviton e o fóton

Tabela 4 – Os momentos da quarta aula da sequência.

A quinta aula, “Física Nuclear – Parte II”, também se iniciou com uma breve revisão da aula anterior, a fim de retomar alguns pontos principais sobre a interação nuclear forte e ampliar as discussões sobre tópicos que a envolvam. Assim, o segundo momento lidou com o conceito de energia de ligação, um conceito-chave para que, nos momentos seguintes, pudessem ser explorados os processos de fusão nuclear, a origem da energia do Sol e, conseqüentemente, a formação de elementos mais pesados no Universo.

Em seguida, entrou-se mais a fundo no tópico de decaimentos nucleares, discutindo os vários tipos de decaimentos existentes: alfa, beta e gama. O processo de fissão nuclear e os perigos da radioatividade associados a ambos os processos de fusão e fissão foram discutidos. Diversos tópicos relacionados a essa temática foram abordados em seguida, como o falecimento de (Marie) Curie após décadas de trabalhos exposta à radiação, a bomba de Hiroshima, e os acidentes de Chernobyl e Fukushima. Alguns mecanismos de controle de usinas nucleares foram apresentados, bem como questões políticas e éticas relacionadas à energia nuclear, e algumas de suas vantagens quando comparada a outras formas de geração de energia.

Por fim, foram abordadas questões sobre como o ser humano tem lidado com o lixo radioativo, por exemplo usando-o em missões espaciais. O último momento serviu para dar uma breve noção dos caminhos futuros no ramo da energia nuclear. Nesse momento, lidou-se com questões éticas sobre como o ser humano rapidamente construiu bombas a partir de processos de fissão e, mais recentemente, a partir de processos de fusão, como a bomba de hidrogênio mas, no entanto, ainda não foi capaz de desenvolver um mecanismo social benéfico de geração de energia a partir dos mesmos processos de fusão.

A quinta aula consistiu em 16 momentos, que identificamos na tabela 5.

Aula 5: Física Nuclear – Parte II	
1	Breve revisão da aula anterior
2	Energia de ligação
3	O processo de fusão nuclear
4	A energia do Sol e a formação de elementos no Universo
5	O que são decaimentos nucleares?
6	Decaimento alfa
7	Decaimento beta
8	Decaimento gama
9	O processo de fissão nuclear
10	A radioatividade e seus perigos: Marie Curie e Chernobyl
11	A radioatividade e seus perigos: a bomba de Hiroshima
12	A radioatividade e seus perigos: o desastre de Fukushima
13	Mecanismos de controle em usinas nucleares
14	Vantagens da energia nuclear e questões políticas sobre enriquecimento de urânio
15	O que fazer com o lixo radioativo?
16	Energia nuclear a partir de fusão e a bomba de hidrogênio

Tabela 5 – Os momentos da quinta aula da sequência.

### 2.5.3 Aulas 6 e 7: A interação forte (QCD)

O terceiro bloco de aulas da sequência focou na interação forte, onde foram explorados tópicos da Cromodinâmica Quântica (*Quantum Chromodynamics* ou QCD em inglês). Vários conceitos, ideias e motivações já abordados nas discussões sobre as interações gravitacional e eletromagnética foram usados como analogia no contexto dessa nova interação fundamental da Natureza.

Iniciamos com um amplo processo de formação em um dos conceitos-chave da Física de Partículas, a seção de choque, explorando atividades de análise gráfica e de ordens de grandeza para guiar os estudantes, sempre estimulando-os a refletir sobre os principais passos do desenvolvimento científico. Essas ferramentas auxiliaram o estudo da seção de choque para o átomo de Rutherford, que acabou por motivar a introdução de novos componentes (os quarks) nos prótons e nos nêutrons e culminou na mais recente descrição para o átomo. Dessa forma, no momento seguinte foram apresentados processos que envolvem os quarks, suas características, e como eles forneceram pistas para consolidar a existência de uma nova interação fundamental da Natureza: a interação forte. Por sua vez, essa nova interação foi responsável por abrir um novo campo na Física de Partículas: a Cromodinâmica Quântica. Os diagramas de Feynman e as partículas mediadoras dessa nova interação, os glúons, foram introduzidos em comparação com as partículas mediadoras das interações do primeiro bloco de aulas da sequência. Finalizamos o terceiro bloco de aulas com explicações sobre onde são feitos experimentos relacionados a essa nova interação e o que eles buscam compreender. Discutiui-se também como essa nova interação se relaciona aos processos de fusão e fissão, à energia do Sol e à energia nuclear, processos abordados

no segundo bloco de aulas.

A seguir mencionamos os momentos didáticos explorados em sala de aula no contexto da interação forte e da Cromodinâmica Quântica (QCD).

A sexta aula, “A seção de choque e subestruturas nos prótons e nêutrons”, se iniciou com uma breve revisão da aula anterior, onde os conceitos principais referentes à energia nuclear foram lembrados e consolidados. Em seguida, os experimentos de Thomson e de Rutherford-Geiger-Marsden foram também lembrados, com o intuito de iniciar o foco da aula para um dos conceitos mais fundamentais na Física de Partículas: a seção de choque. Foram discutidas quais as grandezas e de que maneira elas estão relacionadas a esse conceito, a fim de compreender o quão forte é uma determinada interação estudada. Sua dependência com o número de partículas alfa desviadas e seus ângulos de desvios, bem como as mudanças com o aumento da energia das partículas alfas incidentes foram discutidas em momentos próprios.

A aula seguiu com uma discussão sobre como se dá o progresso na Ciência, usando como pano de fundo a situação de como a seção de choque se altera com o aumento da energia da partícula incidente no experimento de Rutherford-Geiger-Marsden, o que revelou que a constituição do átomo de Rutherford precisava de ajustes e induziu a ideia de que os componentes do núcleo atômico deveriam possuir subestruturas.

Nos momentos seguintes discutiu-se o porquê da necessidade de aceleradores de partículas, enfatizando como conseguimos enxergar em menores escalas somente quando essas partículas atingem altas velocidades. A fim de estimular uma conversa qualitativa com os estudantes, foi usada a relação de Planck-Einstein entre energia e comprimento de onda.

Nos últimos momentos dessa aula foram realizadas duas brincadeiras com os estudantes. A primeira brincadeira simulou uma questão do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), para que eles discutissem como deveria ser a composição do átomo e seu núcleo atômico a partir do gráfico de seção de choque obtido por Rutherford-Geiger-Marsden quando a energia da partícula incidente no experimento que leva seus nomes foi aumentada. A segunda brincadeira envolveu uma questão da Fundação Universitária para o Vestibular (FUVEST), que forneceu um espaço para discutir como a leitura de gráficos na Ciência é extremamente relevante para que novas hipóteses sejam formuladas sobre diversos tópicos de estudo, fazendo com que a Ciência progrida pouco a pouco. Para isso, foi traçado um paralelo com o exemplo que tinha sido discutido em momentos anteriores: o da nova visão para o núcleo atômico a partir do gráfico da seção de choque do experimento de Rutherford-Geiger-Marsden para partículas incidentes a altas energias.

A sexta aula consistiu em 11 momentos, identificados na tabela 6.

A sétima aula, “Os quarks e suas cores”, se iniciou com uma discussão sobre o

<b>Aula 6: A seção de choque e subestruturas nos prótons e nêutrons</b>	
1	Breve revisão da aula anterior
2	Relembrando os experimentos de Thomson e de Rutherford-Geiger-Marsden: introdução ao conceito de seção de choque
3	A seção de choque e o número de partículas alfa desviadas
4	A seção de choque e o ângulo de desvio
5	A seção de choque e o aumento da energia da partícula alfa incidente: além do átomo de Rutherford
6	O progresso na Ciência: observação em desacordo com teoria
7	A relação de Planck-Einstein entre energia e comprimento de onda: partículas com altas energias conseguem enxergar em menores escalas
8	Por que precisamos de aceleradores de partículas?
9	Interpretando o gráfico da seção de choque após correção para altas energias: brincadeira simulando questão do ENEM e subestruturas dos prótons e nêutrons
10	Interpretando gráficos com uma questão da FUVEST
11	O levantamento de hipóteses na Ciência com uma questão da FUVEST

Tabela 6 – Os momentos da sexta aula da sequência.

que são aceleradores e colisores de partículas, distinguindo-os e enfatizando suas principais características, motivada por uma pergunta de um estudante. Em seguida os principais pontos da aula anterior foram revisados brevemente, com foco nas subdivisões do átomo, de seu núcleo e das partículas que compõem esse núcleo.

Dessa forma, abriu-se um gancho para debater sobre a importância da análise gráfica na Ciência e foi lembrado como uma simples análise gráfica foi suficiente para que a comunidade científica levantasse a hipótese de que prótons e nêutrons deveriam possuir subestruturas. Além da discussão sobre a importância da análise gráfica, discutiu-se também a relevância de compreender ordens de grandeza na Ciência para que as hipóteses elaboradas e o desenvolvimento de novas ideias sejam bem fundamentados. Os alunos exploraram diversos objetos diferentes para pensar sobre ordem de grandeza, desde tamanhos de postes de rua e a distância de Vitória até São Paulo, culminando no tamanho de um átomo.

No momento seguinte foi introduzido o conceito de espalhamento profundamente inelástico, em que um elétron muito energético consegue interagir com o que está dentro do próton ou do nêutron, enxergando suas subestruturas. A seção de choque resultante foi novamente comparada com a prevista pelos átomos de Thomson e de Rutherford, sendo menor do que a de Rutherford que, por sua vez, é menor do que a de Thomson. Esse comportamento indica a passagem de um átomo representado por uma esfera para um átomo formado por partículas pontuais no núcleo e, finalmente, para um átomo formado por partículas com subestruturas no núcleo. Logo em seguida, as cargas elétricas dos quarks foram informadas e, a partir desses dados, os estudantes foram instigados a obter a composição dos prótons e dos nêutrons em termos dos quarks.

Em seguida, as motivações para o modelo de quarks foram apresentadas, como a descoberta de várias partículas no final da década de 40 e na década de 50 que puderam ser agrupadas em termos de suas composições por quarks. O nome geral a todas as partículas formadas por quarks foi apresentado: hádrons. Em seguida, uma pergunta sobre se os estudantes já tinham ouvido falar do Grande Colisor de Hádrons (o LHC na sigla em inglês para *Large Hadron Collider*), na Suíça, fomentou uma breve discussão sobre o que tem sido feito nesse colisor.

Retomou-se uma conversa sobre as características peculiares dos quarks, com a introdução da carga cor que todos eles carregam e, com isso, a motivação para a existência de uma nova interação fundamental da Natureza: a interação forte. Os glúons, mediadores dessa interação, foram apresentados, e os estudantes exploraram alguns diagramas de Feynman com partículas que interagem pela interação forte para consolidar conceitos de conservação de carga, seja eletromagnética ou de cor.

Por fim, os alunos discutiram sobre qual seria o número de quarks que poderia formar partículas, tendo em vista que só observamos na Natureza partículas de cor branca. Relacionado a esse aspecto, também foi colocado em debate o porquê de não conseguirmos observar quarks isolados. O último momento foi reservado para estabelecer, a partir dessa nova interação fundamental, a origem da interação forte residual entre prótons e nêutrons, esta última responsável pelos tópicos discutidos sobre a energia nuclear, fazendo um elo entre as aulas 6 e 7 com as aulas 4 e 5 do segundo bloco.

No fim dessa aula, o professor mencionou aos alunos que, na última aula da sequência, eles poderiam apresentar um seminário curto sobre pesquisa própria em tópicos mais avançados da Física de Partículas além do Modelo Padrão, modelo que já havia sido introduzido brevemente na primeira aula da sequência e que será trabalhado no quarto e último bloco de aulas. Então foram distribuídas listas com sugestões de tópicos para que os estudantes já pudessem refletir sobre suas escolhas à medida que a sequência de aulas avançava, dando não só um tempo razoável para a preparação dos seminários pelos estudantes, mas também a oportunidade de eles perguntarem sobre os tópicos durante as próximas aulas.

A sétima aula consistiu em 15 momentos, que identificamos na tabela 7.

#### 2.5.4 Aulas 8, 9 e 10: A interação fraca, o bóson de Higgs e além do Modelo Padrão da Física de Partículas

O quarto e último bloco de aulas da sequência abordou a quarta interação fundamental da Natureza: a interação fraca. Novas partículas relacionadas a essa interação foram motivadas, como os neutrinos. Dessa maneira, todas as quatro interações fundamentais da Natureza foram trabalhadas durante a sequência, bem como o entendimento de como três

<b>Aula 7: Os quarks e suas cores</b>	
1	O que são aceleradores e colisores de partículas?
2	Breve revisão da aula anterior
3	A importância da análise gráfica: prótons e nêutrons têm subestruturas
4	A importância de noções sobre ordens de grandeza
5	O espalhamento profundamente inelástico
6	Relembrando as seções de choque para os átomos de Thomson e de Rutherford
7	Prótons e nêutrons são formados por quarks
8	Como surgiu a ideia dos quarks?
9	O que são hádrons e o LHC (Grande Colisor de Hádrons)?
10	As cores dos quarks
11	Os glúons e a interação forte
12	Diagramas de Feynman para a interação forte
13	Por que só existem partículas formadas por 2 ou 3 quarks?
14	Por que não conseguimos ver um quark isolado?
15	A interação forte residual entre prótons e nêutrons: o pión e a energia nuclear

Tabela 7 – Os momentos da sétima aula da sequência.

delas (a interação eletromagnética, a forte e a fraca) estão incorporadas no Modelo Padrão da Física de Partículas. Neste bloco, também foi abordada a descoberta recente no LHC do bóson de Higgs e como o seu papel no fornecimento das massas às partículas contribuiu para consolidar o Modelo Padrão da Física de Partículas. Além disso, nesse último bloco de aulas apresentamos o porquê da interação gravitacional não estar incorporada no Modelo Padrão, bem como os sucessos desse modelo e seus problemas ainda em aberto.

Mencionamos a seguir os momentos didáticos que exploramos em sala de aula dentro do contexto da interação fraca, do Modelo Padrão da Física de Partículas e como ir além dele.

A oitava aula, “O decaimento beta e o mistério da energia desaparecida”, se iniciou com a recapitulação dos decaimentos alfa, beta e gama. Posteriormente, um foco maior foi dado ao decaimento beta, em que a importância das unidades de medida e as conservações da energia e da quantidade de movimento foram fundamentais para determinar a velocidade do elétron liberado nesse decaimento. Dessa forma, os estudantes puderam comparar a previsão teórica para a energia do elétron, que deveria ser constante independente dos experimentos, com o gráfico contendo as observações encontradas nos experimentos realizados. As observações mostraram que a energia era sempre menor do que o esperado e se alterava, o que fez com que os estudantes propusessem uma nova partícula como responsável por carregar parte dessa energia que aparentava ter desaparecido. Dessa forma, introduziu-se uma nova partícula: o neutrino.

Em seguida, exploramos as características dessa nova partícula, como ela foi detectada anos depois de ter sido prevista teoricamente e como ela se relaciona com uma nova interação fundamental da Natureza: a interação fraca. No último momento,

apresentamos as partículas mediadoras dessa nova interação (os bósons  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z$ ), suas características, e alguns processos que as envolvem.

A oitava aula consistiu em 11 momentos, identificados na tabela 8.

<b>Aula 8: O decaimento beta e o mistério da energia desaparecida</b>	
1	Relembrando os decaimentos alfa, beta e gama
2	O decaimento beta: a importância das unidades de medida
3	O decaimento beta: como determinar a velocidade do elétron com as conservações da energia e da quantidade de movimento?
4	O decaimento beta: a velocidade esperada para o elétron e as observações
5	O neutrino: a previsão de Pauli
6	O poder preditivo de uma teoria científica
7	Como os neutrinos foram detectados?
8	A necessidade da interação fraca
9	A interação fraca: troca de $W^+$ , $W^-$ e $Z$
10	A interação fraca: diagramas de Feynman
11	Características da interação fraca

Tabela 8 – Os momentos da oitava aula da sequência.

A nona aula, “O bóson de Higgs e o Modelo Padrão da Física de Partículas”, se iniciou com uma breve recapitulação das partículas e suas características introduzidas na aula anterior. A partir da pergunta de um estudante, abordamos o conceito de partículas virtuais e como os processos que as envolvem são mais frequentes, ou seja, não raros, apenas quando essas partículas apresentam características semelhantes às das partículas reais que lhes dão nome. Do contrário, quanto mais um processo se constituir por partículas virtuais que possuem características distintas das características de partículas reais, mais raro será este processo. Dessa forma, foi abordado o conceito de pico de ressonância e diversos exemplos foram mostrados para instigar que os próprios alunos buscassem, por exemplo, os valores das massas das partículas reais baseados em gráficos de processos altamente prováveis.

Em um segundo momento, retomamos a discussão sobre a energia proveniente do Sol, em que conectamos a interação fraca às primeiras reações que nele ocorrem para fundir núcleos e gerar energia. Conectamos também essas primeiras reações à existência da vida na Terra. As fusões seguintes, responsáveis por formar elementos mais pesados no processo de nucleossíntese, foram conectadas à interação forte. Dessa forma, foi promovida uma conexão do quarto bloco de aulas com o segundo e o terceiro blocos.

No últimos momentos de aula, apresentamos a tabela do Modelo Padrão da Física de Partículas para sistematizar tudo visto até então. Ainda faltava um componente primordial que foi recente descoberto em 2012 no LHC: o bóson de Higgs, em homenagem a um dos pesquisadores que sugeriram sua existência, Peter Higgs. Os estudantes logo demonstraram interesse em descobrir quem estaria no lugar de um pequeno bloco com

uma interrogação na tabela do Modelo Padrão, que indicava a ausência desse último componente. Assim, foi abordado como a Ciência é colaborativa e é constantemente desenvolvida, apresentando como se deu a descoberta do Higgs no LHC e qual é o seu papel dentro da Física de Partículas, com o uso de animações para ilustrar os conceitos relevantes [TED-Ed, 2013]. A tabela do Modelo Padrão estava completa. Foram então enfatizados os diversos sucessos desse modelo e apontados os problemas ainda em aberto, fazendo referência à lista já distribuída na aula 7 com alguns tópicos que os alunos ficaram de investigar para preparar seminários curtos a serem apresentados na última aula da sequência, a aula 10. Neste momento final também foram confirmados e anotados os tópicos escolhidos pelos estudantes para suas apresentações.

A nona aula consistiu em 12 momentos, que identificamos na tabela 9.

<b>Aula 9: O bóson de Higgs e o Modelo Padrão da Física de Partículas</b>	
1	Breve revisão da aula anterior
2	Partículas virtuais
3	Interação entre elétrons e pósitrons: o pico de ressonância e a massa da partícula $Z$
4	Descobrimos novas partículas e suas massas com os picos de ressonância
5	Nucleossíntese: formando elementos mais pesados com as interações fraca e forte
6	Apresentando a tabela do Modelo Padrão da Física de Partículas
7	O bóson de Higgs
8	A Ciência é colaborativa: a descoberta do bóson de Higgs no LHC em 2012
9	A unificação na interação eletrofraca: o papel do Higgs em dar massas às partículas
10	A tabela completa do Modelo Padrão da Física de Partículas e a massa do Higgs
11	Os sucessos do Modelo Padrão da Física de Partículas
12	Problemas em aberto do Modelo Padrão: tópicos para seminários dos estudantes

Tabela 9 – Os momentos da nona aula da sequência.

A décima aula, “Além do Modelo Padrão da Física de Partículas”, se iniciou com o seminário da estudante Marie, que se prontificou a realizar uma pesquisa e preparar uma apresentação para a turma sobre matéria escura. Após o seminário da aluna, abriu-se tempo para perguntas. O restante da aula foi dedicado a uma conversa informal sobre tópicos além do Modelo Padrão da Física de Partículas, que foram selecionados pelos próprios alunos. Os estudantes perguntavam sobre os tópicos e o professor guiava as aulas, com sistematização das principais ideias de cada um dos tópicos.

Os tópicos foram variados e os momentos então divididos para cada um deles. No final da aula, um espaço foi aberto para ouvir os pensamentos gerais dos estudantes sobre as aulas e, em seguida, para que o professor fizesse as últimas considerações sobre elas, apresentando um panorama geral do que foi abordado. Ao longo das aulas, diversos alunos perguntaram sobre a origem de algumas expressões matemáticas e o professor respondia de maneira qualitativa, pois muitas delas exigiam o ferramental do Cálculo Diferencial e Integral. No último momento da aula, o professor aproveitou para dar noções básicas qualitativas ao aluno dessa ferramenta de grande importância para a Física, a fim de que

os alunos compreendessem que as expressões das aulas e muitas com as quais já estão habituados são dele originadas, ou seja, não são expressões mágicas sem origem e que apenas funcionam. Mas há todo um significado e construção para elas. No total, a aula consistiu em 12 momentos, apresentados na tabela 10.

<b>Aula 10: Além do Modelo Padrão da Física de Partículas</b>	
1	Seminários dos estudantes
2	Perguntas sobre os seminários
3	A energia escura
4	Os áxions
5	Dimensões extras
6	Buracos negros primordiais
7	O spin e a supersimetria
8	Como buscar a supersimetria?
9	A teoria de cordas
10	<i>Feedback</i> dos estudantes
11	Panorama final sobre as aulas
12	A importância do Cálculo na Física e algumas noções

Tabela 10 – Os momentos da décima aula da sequência.

## 2.6 Metodologia da análise de dados

De posse dos momentos da sequência proposta e da intervenção específica em sala de aula, apresentamos, nesta seção, a metodologia utilizada para a análise desse rico material. Alicerçamos essa apresentação com indicadores para a alfabetização científica e para o engajamento dos estudantes presentes na literatura. Por fim, elaboramos os indicadores que consideramos relevantes e serão analisados no capítulo 3.

O percurso metodológico desta pesquisa possui cunho qualitativo e caráter de estudo de caso.

A pesquisa qualitativa permite considerar a complexidade dos processos envolvidos a partir de dados coletados diretamente no ambiente natural de ação pelo(a) próprio(a) pesquisador(a), se utilizando de um papel descritivo amplo que considera importante todos os sujeitos, os significados e os pontos de vista atribuídos às situações [LÜDKE; ANDRÉ, 1986].

De fato,

Nessa abordagem valoriza-se o contato direto e prolongado do pesquisador com o ambiente e a situação que está sendo estudada. (...) Aqui o pesquisador deve aprender a usar sua própria pessoa como o instrumento mais confiável de observação, seleção, análise e interpretação dos dados coletados. (GODOY [1995], p. 62)

Ela complementa, sobre o aspecto descritivo da abordagem qualitativa,

A palavra escrita ocupa lugar de destaque nessa abordagem, desempenhando um papel fundamental tanto no processo de obtenção dos dados quanto na disseminação dos resultados. (...) Visando à compreensão ampla do fenômeno que está sendo estudado, considera que todos os dados da realidade são importantes e devem ser examinados. O ambiente e as pessoas nele inseridas devem ser olhados holisticamente: não são reduzidos a variáveis, mas observados como um todo. (GODOY [1995], p. 62)

O interesse em adotar a abordagem qualitativa se sustenta na tentativa de compreensão das estruturas com as quais os sujeitos que fornecem os dados da pesquisa fundamentam suas ações. Sobre o interesse de pesquisadores pela abordagem qualitativa, GODOY [1995] corrobora que

O interesse desses investigadores está em verificar como determinado fenômeno se manifesta nas atividades, procedimentos e interações diárias. Não é possível compreender o comportamento humano sem a compreensão do quadro referencial (estrutura) dentro do qual os indivíduos interpretam seus pensamentos, sentimentos e ações. (GODOY [1995], p. 63)

O local onde são produzidas as situações e os sujeitos da pesquisa fornecem os dados, enquanto a vivência do(a) pesquisadora(a) com o local onde as ações se desenvolvem favorece uma metodologia de estudo de caso.

Um estudo de caso é ideal quando se pretende conhecer a estrutura dos fatos e as perspectivas de significados dos sujeitos que agem em contextos específicos no local onde esses dados são produzidos, a fim de identificar possíveis causas para padrões observados [MORAES; TAZIRI, 2019]. De acordo com GIL [2002], algumas características desse tipo de delineamento, e que se aplicam em nossa pesquisa, são: a descrição da situação do contexto que se investiga, a formulação de hipóteses e a explicação de variáveis causais de determinados fenômenos em situações complexas que não possibilitam a utilização de levantamentos e experimentos. De fato, como já mencionamos, essas características emergiram a partir de dados coletados diretamente no local de pesquisa (sala de aula), fornecidos pelos sujeitos participantes da pesquisa (alunos do ensino médio da rede pública estadual do estado do Espírito Santo), que considerou poucos objetos de estudo. A saber, a compreensão de conceitos-chave da Física de Partículas e suas relações com tecnologia, sociedade e meio-ambiente em uma sequência didática que buscou fomentar a alfabetização científica e o engajamento dos estudantes. A exploração desses aspectos e suas relações de maneira ampla e detalhada podem nos fornecer indícios sobre a efetividade, a viabilidade e as potencialidades de sequências didáticas como a nossa, que visam promover um contato maior de estudantes com tópicos mais contemporâneos da Física já no ensino médio.

### 2.6.1 Indicadores de alfabetização científica

Na seção 1.1, apresentamos a concepção de alfabetização científica utilizada nesse trabalho. Ela se alicerça no pressuposto freireano de que o(a) alfabetizado(a) deve realizar uma leitura do mundo para entender suas necessidades e, assim, ser capaz de transformá-lo. Apesar das controvérsias sobre o termo nos diversos idiomas ao redor do mundo e suas várias traduções para a língua portuguesa, é possível identificar elementos comuns, presentes nos mais diversos trabalhos que discutem a alfabetização científica, estruturados em três grupos: o da compreensão básica de termos, conhecimentos e conceitos científicos; o da compreensão da natureza das ciências e dos fatores éticos e políticos que as envolvem; e o do entendimento das relações entre ciência, tecnologia, sociedade e meio-ambiente.

Em qualquer processo de ensino-aprendizagem que busca incorporar a alfabetização científica é possível identificar alguns indicadores que demonstram o desenvolvimento de habilidades e conhecimentos associados ao trabalho de cientistas. De acordo como [SASSERON; CARVALHO \[2008\]](#), são três os grupos de indicadores, cada um representando um bloco de ações distintas presentes no dia a dia do trabalho de cientistas:

- i) ações que envolvem o trabalho com os dados obtidos em uma investigação;
- ii) ações que estruturam o pensamento científico;
- iii) ações que buscam o entendimento da situação analisada.

Com relação ao primeiro bloco de ações podem ser identificados os seguintes elementos: a **seriação de informações**, a **organização de informações** e a **classificação de informações**. O primeiro elemento busca estabelecer as bases para uma pesquisa, um conjunto de dados, por exemplo. O segundo elemento aparece quando se discute a metodologia de uma pesquisa, um arranjo das informações. O terceiro elemento aparece quando se pretende hierarquizar as informações, estabelecendo relações entre elas.

O segundo bloco de ações envolve as formas de organizar o pensamento, através do **raciocínio lógico**, quando relaciona a forma das ideias, e/ou do **raciocínio proporcional**, quando ideias e variáveis são relacionadas.

Já o terceiro bloco contempla o maior número de elementos. São eles: o **levantamento de hipóteses**, o **teste de hipóteses**, a **justificativa**, a **previsão** e a **explicação**. O levantamento de hipóteses ocorre nos momentos em que suposições sobre determinada ideia ou assunto surgem, e o teste de hipóteses ocorre quando essas hipóteses são colocadas em xeque. Já a justificativa aparece quando ideias são incorporadas a uma linha de raciocínio que fortalecem uma determinada afirmação. A etapa da previsão ocorre quando se sugere que algum evento seja proveniente de alguma ideia e/ou fenômeno em análise. O último elemento nesse bloco de ações, a explicação, propõe reunir e relacionar todos os elementos anteriores: informações, ideias, hipóteses, previsões.

Cabe ressaltar que cada um desses indicadores pode se manifestar independente-

mente da manifestação de outros em sala de aula. Além de serem independentes entre si podem, inclusive, aparecer concomitantemente.

Esses indicadores aparecem na tabela 11 abaixo, com os respectivos códigos a serem adotados no decorrer das análises, resultados e discussões do capítulo 3.

Ação do fazer científico	Elementos do fazer científico	Código
Trabalho com os dados obtidos em uma investigação	Seriação de informações	AC-I1A
	Organização de informações	AC-I1B
	Classificação de informações	AC-I1C
Estruturação do pensamento científico	Raciocínio lógico	AC-I2A
	Raciocínio proporcional	AC-I2B
Entendimento da situação analisada	Levantamento de hipóteses	AC-I3A
	Teste de hipóteses	AC-I3B
	Justificativa	AC-I3C
	Previsão	AC-I3D
	Explicação	AC-I3E

Tabela 11 – As ações do fazer científico, com os respectivos códigos a serem utilizados no capítulo 3, referente à análise, resultados e discussões.

É interessante notar como esses blocos de ações que fornecem indicadores de alfabetização científica estão relacionados às **operações epistemológicas** propostas por JIMÉNEZ-ALEIXANDRE; DÍAZ DE BUSTAMANTE; DUSCHL [1998]. São elas: **indução; dedução; causalidade; definição; classificação; apelo a analogia, exemplo, atributo ou autoridade; consistência com outro conhecimento, com experiência, com metafísica, ou compromisso com consistência; e plausibilidade.**

De fato, essas operações ajudam a revelar relações entre as diversas ações do fazer científico. Elas serão usadas no presente trabalho para caracterizar cada um dos indicadores de alfabetização científica propostos por SASSERON; CARVALHO [2008], que compõem os blocos de ações discutidos acima.

Essas operações foram elaboradas a partir de estudos em outras áreas. Conforme JIMÉNEZ-ALEIXANDRE; DÍAZ DE BUSTAMANTE; DUSCHL [1998], “extraímos de várias fontes: das categorias do discurso sobre mudança conceitual de Thorley (1992) e das operações epistemológicas para as ciências sociais de Pontecorvo e Girardet (1993)” (JIMÉNEZ-ALEIXANDRE; DÍAZ DE BUSTAMANTE; DUSCHL [1998], p. 5). Além dessas fontes, Jiménez-Aleixandre, Díaz de Bustamante e Duschl (1998) utilizaram suas próprias análises das conversas e das performances dos estudantes-sujeitos da pesquisa desenvolvida neste trabalho de referência, adaptando-as para as ciências experimentais.

As cinco primeiras operações (indução, dedução, causalidade, definição, classificação) são bem conhecidas por já terem sido amplamente abordadas na literatura. Por isso, assumimos que o(a) leitor(a) já esteja familiarizado(a) com esses termos. As operações de apelo são amplamente utilizadas para extrair sentidos de observações ou lidar com

novas situações. Note que não pretendemos fazer uma distinção entre apelo ao exemplo e apelo ao protótipo, como fizeram [JIMÉNEZ-ALEIXANDRE; DÍAZ DE BUSTAMANTE; DUSCHL, 1998]. Eles consideraram apelo ao exemplo como referente a um objeto ou organismo de alguma categoria, mesmo quando este era usado como uma idealização, ao passo que o apelo ao protótipo foi considerado como referindo-se a uma idealização de toda uma categoria. Para exemplificar essa distinção eles citam que um protótipo seria uma idealização de uma célula vegetal, enquanto uma célula de uma amostra de casca de cebola seria um exemplo. Com relação à consistência, eles afirmam “consistência é uma operação relevante na cultura científica porque, para compreender o mundo físico e natural, há a necessidade de reconhecer a universalidade das explicações” (JIMÉNEZ-ALEIXANDRE; DÍAZ DE BUSTAMANTE; DUSCHL [1998], p. 15). Com relação à última operação, a plausibilidade, ela ocorre quando é feita uma avaliação quanto à admissibilidade ou não de um determinado conhecimento apresentado, seja ele pessoal ou manifesto por outros.

A partir dos estudos apresentados acima, reunimos essas operações epistemológicas na tabela 12 abaixo, de modo a facilitar a caracterização dos indicadores de alfabetização científica que surgirem na análise de nossa proposta de sequência didática sobre Física de Partículas, como iremos abordar no capítulo 3.

Também é interessante notar como os indicadores de alfabetização científica e as operações epistemológicas aparecem no decorrer das argumentações de estudantes em sala de aula. Portanto, podemos também analisar como indicadores de alfabetização científica, além de se associarem às operações epistemológicas, também se associam à **qualidade do argumento** [DRIVER; NEWTON; OSBORNE, 2000] ou aos **níveis hierárquicos de argumentação** [TOULMIN, 2001]. Dessa forma obteremos elementos extras para caracterizar a consistência dos indicadores de alfabetização científica ao longo do processo de ensino-aprendizagem.

De acordo com [DRIVER; NEWTON; OSBORNE, 2000], qualquer processo de ensino-aprendizagem sobre ciência que busque incorporar seu caráter social e explorar o desenvolvimento de critérios avaliativos usados em teorias científicas deve dar alta prioridade ao papel da argumentação. Uma educação com essa ênfase contribui para realçar a compreensão sobre o que é fazer ciência pelo público geral, aprimorando o processo de alfabetização científica.

Uma educação que se preocupa em apresentar a ciência como um apanhado de fatos sobre o mundo, sem o cuidado de examinar criticamente as premissas sobre questões que perpassam o dia a dia de todos, possui um viés declaradamente positivista. Alfabetizar para as ciências não consiste em apresentar respostas prontas e corretas, mas sim considerar alternativas, avaliar evidências e premissas, desafiar paradigmas. Por isso a argumentação é uma ferramenta valiosa para se fazer ciência. É amplamente utilizada por cientistas das mais diversas áreas para checar hipóteses, levantar questionamentos, colocar ideias em

Operação epistemológica	Especificidade	Característica(s)	Código
Indução		Busca por padrões/regularidades	<b>AC-II1</b>
Dedução		Identificação de exemplos particulares de leis, regras, princípios	<b>AC-II2</b>
Causalidade		Relação causa-efeito, busca por mecanismos, predição	<b>AC-II3</b>
Definição		Exposição de entendimento de um conceito	<b>AC-II4</b>
Classificação		Agrupamento de objetos, organismos de acordo com critérios	<b>AC-II5</b>
Apelo ao/à	analogia; exemplo ou protótipo; atributo; autoridade	Representação primária; Objeto de categoria/idealização; Diversas (depende da categoria); Fontes de conhecimento (livros, professores, etc.)	<b>AC-II6A</b> <b>AC-II6B</b> <b>AC-II6C</b> <b>AC-II6D</b>
Consistência	com outro conhecimento; com experiência; (compromisso com);	Fatores de consistência, particular (com a experiência) ou geral (necessário para explicações de similaridade)	<b>AC-II7A</b> <b>AC-II7B</b> <b>AC-II7C</b>
Plausibilidade		Afirmação ou avaliação do conhecimento próprio ou dos outros	<b>AC-II8</b>

Tabela 12 – Operações epistemológicas que relacionam ações do fazer científico com os respectivos códigos a serem utilizados no capítulo 3, referente à análise, resultados e discussões. Em “Consistência (compromisso com)” entendemos a manifestação do desejo em ser consistente durante a execução das ações do fazer científico. Tabela baseada na proposta de Jiménez-Aleixandre, Díaz e Duschl (1998, p. 7). Ver também [JIMÉNEZ-ALEIXANDRE; RODRÍGUEZ; DUSCH \[2000\]](#), p. 768. Notar que em nossa tabela desconsideramos a operação de consistência metafísica pois esse indicador não ocorreu uma única vez durante as aulas.

disputa constantemente, pois só assim somos capazes de enxergar além, de elaborar novos saberes, de discernir quais deles são mais confiáveis.

Para [[DRIVER; NEWTON; OSBORNE, 2000](#)], a argumentação pode ocorrer tanto em nível individual, em atividades como o pensamento e a escrita com propósito social, quanto em nível social, em atividades que têm importância para um grupo/comunidade. Ou seja, argumentar incorpora características que vão além da lógica pura que, por sua vez, é totalmente descontextualizada de qualquer ambiente social.

As principais operações de um argumento são apresentadas pelo trabalho pioneiro<sup>2</sup> de [TOULMIN \[2001\]](#):

- **dados:** fatos aos quais recorreremos com fundamentos para uma alegação;

<sup>2</sup> A referência aqui utilizada é de uma edição em língua portuguesa do pioneiro livro de [TOULMIN \[1958\]](#).

- **conclusão:** a alegação cujos méritos procuramos estabelecer;
- **garantias:** afirmações que funcionam como pontes, regras, para justificar conexões entre os dados e a conclusão;
- **apoios:** avais básicos sem os quais as garantias não possuiriam justificativas.

Em argumentos mais complexos, Toulmin (2001) identifica ainda outras duas operações:

- **qualificadores:** condições para que nossos dados impliquem em uma determinada conclusão, limitações de nossa conclusão;
- **refutadores:** condições para que nossa conclusão não seja válida.

Apesar de destrinchar a estrutura de um argumento, o trabalho de Toulmin não aborda como analisar o contexto no qual um determinado argumento foi proferido. Além disso, Toulmin não incorpora qualquer julgamento sobre o argumento em si, ou seja, sua qualidade.

Em nosso estudo, o contexto é o do ambiente escolar. Portanto, os argumentos a serem analisados no presente trabalho lidam com ações e reações de estudantes quando expostos às atividades incorporadas à sequência de intervenções aqui proposta.

Com relação à análise da qualidade da argumentação utilizaremos os níveis hierárquicos de [DRIVER; NEWTON; OSBORNE, 2000], conforme citação de SASSERON; CARVALHO [2008]

(...) os argumentos classificados no **nível 0** são aqueles que se dão quando há afirmações isoladas sem justificativa, ou quando há afirmações que competem sem justificativas. Argumentos do **nível 1** são as afirmações isoladas com justificativa. Afirmações que competem havendo justificativas são do **nível 2**. No **nível 3** aparecem as afirmações que competem com justificativas e qualificadores e as afirmações que competem com justificativas e trazendo refutadores. O último nível de argumentação é o **nível 4** e aparece quando se faz julgamentos integrando diferentes argumentos. (SASSERON; CARVALHO [2008], p. 337, grifo nosso).

Para facilitar a visualização das principais operações de um argumento, bem como dos níveis hierárquicos de argumentação a serem considerados em nossa análise, elaboramos as tabelas 13 e 14.

## 2.6.2 Indicadores de engajamento

Na seção 1.2 apresentamos o referencial teórico sobre engajamento. Nela vimos que o engajamento possui uma natureza multifacetada e auxilia na compreensão das experiências no ambiente escolar e na preparação de atividades que favorecem o processo de ensino-aprendizagem. A literatura sobre o assunto aborda três tipos de engajamento que se relacionam de forma dinâmica: o comportamental, o emocional e o cognitivo. É a partir da literatura apresentada naquela seção e em em referências extras destacadas na

Operação de argumento	Código
Dados	AC-III1
Conclusão	AC-III2
Garantias	AC-III3
Apoios	AC-III4
Qualificadores	AC-III5
Refutadores	AC-III6

Tabela 13 – Operações de argumento e seus respectivos códigos de referência para a análise da argumentação no decorrer das aulas da sequência didática aqui proposta.

Nível hierárquico	Características				Código
	Afirmações	Justificativas	Qualificadores	Refutadores	
0	isoladas	ausentes	não	não	AC-IV0
	em disputa	ausentes	não	não	
1	isoladas	presentes	não	não	AC-IV1
2	em disputa	presentes	não	não	AC-IV2
3	em disputa	presentes	sim	não	AC-IV3
	em disputa	presentes	não	sim	
4	em disputa	presentes	sim	sim	AC-IV4

Tabela 14 – Níveis hierárquicos e seus respectivos códigos de referência para a análise da argumentação no decorrer das aulas da sequência didática aqui proposta.

presente seção que elaboramos, separadamente para cada um dos tipos, os indicadores de engajamento. Eles serão utilizados em nossa análise sobre os diferentes níveis de engajamento ao longo da aplicação da sequência didática proposta nesse trabalho no capítulo 3.

### Engajamento comportamental

As escalas de engajamento comportamental incluem indicadores variados, como os de conduta e participação/solução das tarefas [FREDERICKS; BLUMENFELD; PARIS, 2004]. Por sua vez, tais indicadores consideram dois tipos de comportamento: o positivo e o negativo.

Os indicadores de comportamento positivo e, portanto, de engajamento, consideram critérios como: a participação e a execução das tarefas de sala e de casa, bem como a adesão às regras escolares. Os indicadores de comportamento negativo avaliam o contexto tanto de sala de aula quanto o escolar, e consideram o número de faltas e atrasos, brigas ou confusões, e interferências nas atividades dos outros estudantes, como critérios que demonstram desengajamento. Tais indicadores não devem ser pensados como medidas fixas quantitativas, mas devem ser ponderados qualitativamente. Isso se deve ao fato de ser frequente a ocorrência das duas situações opostas: i) um(a) estudante considerado(a) de comportamento ruim quanto às regras escolares ser extremamente bem-sucedido(a) na participação/solução de tarefas e ii) um(a) estudante considerado(a) de comportamento

excelente quanto às regras escolares não participar/solucionar as tarefas.

Diante dessas ponderações, para avaliarmos o engajamento positivo dos estudantes, diversas escalas podem ser elaboradas. Em uma delas, professores podem ser solicitados a avaliar uma série de itens relacionados a um determinado estudante. Por exemplo, “ele(a) é ou não persistente quando confrontado(a) com tarefas mais elaboradas”, ou “ele(a) realmente tenta solucionar novas tarefas” [FINN; PANNOZZO; VOELKL, 1995].

Outra escala para avaliar o engajamento comportamental pode ser construída através de técnicas observacionais, em que observadores avaliam o engajamento desde “não interessado” até “totalmente envolvido” [LEE; ANDERSON, 1993; NEWMANN, 1992; STIPEK, 2002].

Ainda outra escala pode ser construída usando uma auto-avaliação por parte dos próprios estudantes. Pode lhes ser sugerido selecionar itens em um questionário (por exemplo, como o encontrado em WELLBORN; CONNELL [1987], demonstrando seu grau de participação e atenção nas aulas e tarefas.

As duas primeiras escalas, por considerarem observações do professor e de outros observadores, são limitadas, porque não são capazes de fornecer uma maior precisão com relação à qualidade da participação ou dos pensamentos dos estudantes quando solucionam as tarefas. Já a última escala é difícil de ser mensurada pois, da mesma forma que o professor e outros observadores não conseguem fazer uma análise realista, não podemos assumir que os estudantes a façam, ainda que se tratem dos sujeitos investigados. Vários fatores psicológicos e sociais podem fazer com que os discentes avaliem seus níveis de participação/solução das tarefas como alto, médio ou baixo, diminuindo ou inflando a realidade e, portanto, não podemos assumir que essa escala possa ser assim representada.

Neste trabalho optamos por não incluir a auto-avaliação por parte dos estudantes quanto ao seus níveis de engajamento comportamentais, pois queríamos uma sequência que fluísse da maneira mais natural possível sem fazer com que os estudantes sentissem que estavam sendo avaliados de alguma forma. Por isso, optamos pela avaliação do engajamento comportamental a partir de nossas observações realizadas em sala.

Relatamos na seção 2.2 que os estudantes participantes não tinham obrigação de frequentar as aulas desta sequência, pois se inseriam em um contexto de atividade extra-curricular. Na mesma seção também relatamos que o próprio professor-coordenador na escola nos informou que alguns estudantes não puderam comparecer em todas aulas porque os dias em que elas foram desenvolvidas variavam, além de alguns estudantes relatarem problemas familiares que os impediam de frequentar a escola durante vários dias, inclusive nos dias de desenvolvimento de nossas aulas. Por esse motivo, não consideramos o número de faltas como um indicador de qualquer nível de desengajamento comportamental. No entanto, consideramos tanto atrasos quanto saídas antes do término das aulas como indicadores de baixo engajamento comportamental.

Cabe ressaltar que, em toda as aulas da sequência, não observamos quaisquer brigas ou confusões por parte dos estudantes, bem como não houve qualquer interferência de um(a) estudante nas atividades de seus colegas. Portanto, com relação a esse critério podemos afirmar de antemão que houve um bom engajamento comportamental.

Portanto, a partir das discussões acima consideramos os seguintes critérios para a análise do engajamento comportamental dos estudantes: a participação nas aulas, a participação/execução nas tarefas de sala, a participação/execução nas tarefas de casa. Tais indicadores são apresentados na tabela 15, com seus respectivos níveis de engajamento comportamental.

Engajamento comportamental					
Indicador	Grau	Nível			Código
		ótimo	regular	insatisfatório	
Participação nas aulas	sempre	X			<b>E-I1A</b>
	regular		X		<b>E-I1B</b>
	nula			X	<b>E-I1C</b>
Participação/execução nas/das tarefas de sala	sempre	X			<b>E-I2A</b>
	regular		X		<b>E-I2B</b>
	nula			X	<b>E-I2C</b>
Participação/execução nas/das tarefas de casa	sempre	X			<b>E-I3A</b>
	regular		X		<b>E-I3B</b>
	nula			X	<b>E-I3C</b>

Tabela 15 – Indicadores de engajamento comportamental elaborados para a análise de dados, seus níveis e códigos correspondentes.

### Engajamento emocional

Da mesma forma que existem várias escalas com indicadores diversos para avaliar o engajamento comportamental por parte dos estudantes, também há um ampla gama de escalas para avaliar o engajamento emocional.

Alguns indicadores estão relacionados às emoções demonstradas pelos estudantes, tais como sentir-se feliz, interessado, triste, cansado, frustrado, irritado, entre outros [CONNELL; WELLBORN, 1991]. Outros indicadores incluem a identificação com a escola e/ou com o(a) professor(a), e atribuição de valores positivos ou negativos com relação à disciplina de aprendizagem, em nosso caso a Física.

Esses indicadores podem ser avaliados tanto por parte dos estudantes quanto por parte dos professores e outros observadores, da mesma forma que a avaliação dos indicadores de engajamento comportamental. No entanto, mensurar vários desses indicadores constitui uma tarefa extremamente complexa, ainda mais quando lidamos com emoções, que são ainda mais difíceis de serem compreendidas e assessoradas. Se essa é uma tarefa complexa para a própria pessoa que lida com suas emoções, é ainda mais complicada para um observador externo.

No quesito de engajamento emocional novamente não utilizamos nenhum tipo de auto-avaliação por parte dos próprios estudantes, mas consideramos apenas nossas observações.

Com relação à avaliação de suas emoções, quando os estudantes demonstravam emoções/expressões positivas e se utilizavam de frases para verbalizá-las, consideramos estas como fortes indicadores de engajamento emocional positivo e classificamos este nível como “ótimo” engajamento emocional. Ainda que os estudantes não tenham verbalizado frases positivas mas utilizaram apenas expressões positivas, como risos e/ou gargalhadas, consideramos tal situação também como de “ótimo” engajamento emocional. Da mesma forma, no extremo oposto, quando estudantes demonstravam emoções/expressões negativas e se utilizavam de frases para verbalizá-las, consideramos estas como fortes indicadores de engajamento emocional negativo e classificamos este nível como engajamento emocional “insatisfatório”. Também consideramos engajamento emocional “insatisfatório” quando os estudantes não verbalizaram frases negativas mas utilizaram apenas expressões negativas de insatisfação, repulsa, entre outros. Classificamos qualquer situação intermediária, ou seja, ocasiões em que as expressões eram negativas mas as frases positivas, ou ocasiões em que as expressões eram positivas mas as frases negativas, como nível “regular” de engajamento.

Da mesma forma, utilizamos também as frases ditas pelos próprios estudantes quando eles demonstravam identificação ou não com a escola e/ou com o professor, e atribuição de valores positivos ou negativos à Física e/ou às Ciências em geral.

Fazendo uso dos indicadores de engajamento emocional elaborados acima, representamos suas caracterizações na tabela 16.

### **Engajamento cognitivo**

O investimento no aprendizado, com o uso de estratégias para facilitá-lo, e o alcance de um maior grau de autonomia na realização de atividades, são algumas características do chamado engajamento cognitivo.

De fato, alguns autores usam o seguinte conjunto de características para auxiliar na identificação de um alto grau de engajamento cognitivo: i) investimento psicológico no aprendizado por meio da flexibilização na resolução de problemas, por exemplo; ii) um desejo de ir além das exigências mínimas, ao demonstrar interesse por situações desafiadoras [CONNELL; WELLBORN, 1991; NEWMANN; WEHLAGE; LAMBORN, 1992; WEHLAGE *et al.*, 1989]. Outros autores compartilham essas características, descrevendo um(a) estudante positivamente e cognitivamente engajado como um valorizador do aprendizado e do conhecimento, que busca solucionar desafios cada vez mais complexos e que são persistentes quando se deparam com dificuldades [BROPHY, 1987; AMES, 1992; DWECK; LEGGETT, 1988; HARTER, 1981].

Engajamento emocional						
Indicador	Expressão	Frase	Nível			Código
			ótimo	regular	insatisfatório	
Emoção	positiva	positiva/n.p.	X			E-II1A
	positiva	negativa		X		E-II1B
	negativa	positiva		X		E-II1C
	negativa	negativa/n.p.			X	E-II1D
Identificação com escola e/ou colegas	positiva	positiva/n.p.	X			E-II2A
	positiva	negativa		X		E-II2B
	negativa	positiva		X		E-II2C
	negativa	negativa/n.p.			X	E-II2D
Identificação com professor	positiva	positiva/n.p.	X			E-II3A
	positiva	negativa		X		E-II3B
	negativa	positiva		X		E-II3C
	negativa	negativa/n.p.			X	E-II3D
Atribuição de valores à Física e/ou às Ciências em geral	positiva	positiva/n.p.	X			E-II4A
	positiva	negativa		X		E-II4B
	negativa	positiva		X		E-II4C
	negativa	negativa/n.p.			X	E-II4D

Tabela 16 – Indicadores de engajamento emocional elaborados para a análise de dados, seus níveis e códigos correspondentes. A notação “n.p.” indica não serem presentes frases verbalizadas, mas a ocorrência do indicador em nível ótimo ou insatisfatório apenas com a presença de expressões positivas, como risos e/ou gargalhadas, ou expressões negativas, demonstrando insatisfação, repulsa, entre outros, respectivamente.

Outros autores definem um alto nível de engajamento cognitivo a partir de altos níveis de estratégia e de autonomia demonstrados pelos estudantes, que emergem quando estes se utilizam de técnicas de práticas, monitoramento, controle de seus esforços na realização de atividades, avaliação de sua própria cognição ao completarem tarefas, entre outros [PINTRICH; DE GROOT, 1990; ZIMMERMAN, 1990; CORNO; MADINACH, 1983; WEINSTEIN; MAYER, 1983]. Cabe ressaltar que estratégias mais elaboradas, além de usos superficiais, como a compreensão de ideias e a criação de conexões entre elas, caracterizam um grau ainda mais elevado de engajamento cognitivo.

A construção de indicadores para o engajamento cognitivo não é trivial mas, neste trabalho, pôde ser simplificada pelos motivos que seguem. Por um lado, por mais que estudantes demonstrem o uso de estratégias elaboradas e alto grau de investimento em seus aprendizados, podem demonstrá-los apenas para conseguir boas notas. Como este trabalho foi elaborado a partir de intervenções em aulas extra-curriculares sem qualquer atividade avaliativa com nota, não nos preocupamos com casos de estudantes que faziam uso de estratégias e investimento em seus aprendizados apenas para alcançar boas notas.

Dessa forma, quando um(a) estudante se mostrou interessado(a) em aprender, demonstrou autonomia, demonstrou desejo de ir além do básico ou utilizou estratégias para auxiliar seu aprendizado, o(a) classificamos como estudante com um nível de engajamento

cognitivo “ótimo” ou “regular”. A decisão para classificá-lo(a) no nível “ótimo” ocorreu quando o grau de engajamento era visivelmente alto e elaborado, por exemplo quando o(a) discente expressava estratégias elaboradas de aprendizado, como a compreensão de ideias e a criação de conexões entre elas (conforme exposto em parágrafos anteriores). Quando os indicadores eram apenas perceptíveis, os classificamos no nível de engajamento cognitivo “regular”. Por fim, consideramos um nível “insatisfatório” de engajamento cognitivo quando o(a) estudante não se mostrou tão interessado(a) em aprender, não demonstrou muita autonomia no aprendizado, demonstrou pouco desejo de ir além do básico, ou fez baixo uso de estratégias.

Apresentamos, na tabela 17, os indicadores que visam auxiliar nossa análise de engajamento cognitivo, com seus respectivos níveis.

Engajamento cognitivo					
Indicador	Grau	Nível			Código
		ótimo	regular	insatisfatório	
Investimento no aprendizado	alto	X			<b>E-III1A</b>
	perceptível		X		<b>E-III1B</b>
	baixo			X	<b>E-III1C</b>
Autonomia	alta	X			<b>E-III2A</b>
	perceptível		X		<b>E-III2B</b>
	baixa			X	<b>E-III2C</b>
Desejo de ir além do básico	forte	X			<b>E-III3A</b>
	perceptível		X		<b>E-III3B</b>
	fraco			X	<b>E-III3C</b>
Uso de estratégias	elaborada	X			<b>E-III4A</b>
	perceptível		X		<b>E-III4B</b>
	fraco			X	<b>E-III4C</b>

Tabela 17 – Indicadores de engajamento cognitivo elaborados para a análise de dados, seus níveis e códigos correspondentes.



## 3 Análise, resultados e discussões

Neste capítulo analisamos as aulas da sequência na seção 3.1, com o intuito de monitorar e discutir os indícios de alfabetização científica e avaliar os níveis de engajamento dos estudantes, conforme os objetivos deste trabalho. Além disso, apresentamos considerações dos estudantes participantes e do professor responsável pela condução das aulas da sequência didática na seção 3.2.

### 3.1 Análise das aulas

Nesta seção analisamos as aulas da sequência com o intuito de avaliar quais indicadores de alfabetização científica estiveram presentes, bem como suas frequências. Além disso, avaliamos também o nível de engajamento geral e dos estudantes que mais estiveram presentes durante as aulas. As aulas foram fragmentadas em momentos, apresentados em detalhes na seção 2.5 e resumidos nas tabelas presentes na mesma seção. Portanto, assumimos que o(a) leitor(a) já está familiarizado(a) com cada um dos momentos das aulas, eventualmente retornando às tabelas apenas para breve consulta e localização durante a análise das aulas.

Em primeiro lugar, fazemos relatos sobre os momentos de cada uma das aulas do bloco de aulas em questão sobre: interações eletromagnética (QED) e gravitacional na subseção 3.1.1, Física Nuclear na subseção 3.1.2, interação forte (QCD) na subseção 3.1.3 e interação fraca, o bóson de Higgs e além do Modelo Padrão da Física de Partículas na subseção 3.1.4. Ao contrário da seção 2.5, onde apenas apresentamos os momentos da sequência didática, aqui enfatizamos as participações dos estudantes, as trocas com o professor e colegas, as observações realizadas, enfim, a análise detalhada de todos os aspectos ocorridos nesses momentos.

Na seção 3.1.5 apresentamos os resultados gerais referentes aos indicadores de alfabetização científica para cada um dos blocos de aulas. Já na seção 3.1.6 apresentamos os resultados sobre os índices de engajamento, onde detalhamos seus níveis para os estudantes que estiveram mais presentes ao longo da sequência.

Como já relatado, a sequência contou com a participação total de quatorze estudantes. A fim de preservar as identidades dos participantes, nos referimos ao professor que aplicou as aulas da sequência simplesmente como “professor” ou “docente”, e adotamos nomes fictícios para os estudantes, fazendo referência a cientistas que atuaram na área da Física de Partículas e/ou contribuíram para o seu desenvolvimento.

### 3.1.1 Aulas 1, 2 e 3: Conhecimentos prévios e as interações eletromagnética (QED) e gravitacional

#### • Aula 1: Introdução à Física de Partículas

A primeira aula da sequência contou com a presença de dez estudantes. O primeiro momento foi de busca dos conhecimentos prévios dos estudantes, motivado pela pergunta “*O que vocês acham que é Física de Partículas?*”. O estudante Werner sugeriu que seria o estudo sobre partículas subatômicas, citando alguns exemplos delas, como o neutrino e o elétron. Complementando o colega, o aluno Enrico disse que partículas são o que formam o átomo e, sistematizando, o professor adicionou que as partículas formam a matéria em geral e perguntou quais seriam as evidências de que a matéria é composta de átomos. Enquanto Werner propôs que temos evidências a partir de observações em aceleradores de partículas, Sonja refutou essa ideia ao dizer que já conhecemos o átomo há mais tempo, desde os gregos antigos, com Platão, Aristóteles e os Quatro Elementos. Neste momento percebeu-se um notável grau de engajamento nesses estudantes, com destaque para a autonomia em trazer novas informações a partir de outras fontes. Também destacamos o interesse da aluna Fabiola em registrar parte da aula, utilizando o celular para capturar fotos e vídeos da turma, e também do slide de capa da apresentação utilizada pelo professor.

Aproveitando a discussão acima, o docente abordou como a Ciência é construída a partir de evidências. Ele propôs que os alunos pensassem sobre essa afirmação e sugerissem argumentos que poderiam utilizar para refutar, por exemplo, o terraplanismo. Os estudantes riram com a proposta e manifestaram repulsa pelo terraplanismo, sugerindo as sombras na Terra e a existência de medições para o diâmetro terrestre como argumentos para combatê-lo. Trazer algo tão atual para esse momento inicial foi muito bem recebido pelos estudantes que, perceptivelmente, se soltaram mais em sala de aula a partir desse momento.

O professor aproveitou então para introduzir o Modelo Padrão como o melhor modelo até então da Física de Partículas, fundamentado a partir de diversas evidências, capaz de explicar a composição da matéria na Natureza e as interações que envolvem as diversas partículas que compõem a matéria. Ao citar o porquê de não atravessarmos uma cadeira quando sentamos nela como exemplo de um dos fenômenos que o Modelo Padrão é capaz de explicar, os estudantes reagiram com curiosidade. O professor sugeriu que eles inicialmente pensassem em termos das forças com as quais já estavam familiarizados em seus estudos de Mecânica.

A utilização dos conhecimentos prévios dos estudantes é uma das variáveis mais importantes que aparece em diversas teorias, metodologias e posturas pedagógicas para o ensino de Física. Como destaques podemos mencionar o ensino por investigação [AZEVEDO, 2004; CARVALHO, 2004; SASSERON, 2015; SOUZA JUNIOR, 2013], a aprendizagem significativa de David Ausubel [AUSUBEL, 2000] e o ensino sob medida de Gregor

Novak [NOVAK, 1999; ARAUJO; MAZUR, 2013].

Dando sequência à aula, Werner e Enrico apresentaram seus conhecimentos prévios diante da proposta situacional do professor e concluíram que existe uma força normal de reação contrária à força peso, de acordo com a 3ª lei de Newton, que nos impede de atravessar a cadeira. Esta força, em última instância, como os estudantes levantaram, seria causada pela repulsão entre elétrons. Neste momento percebemos um alto grau de investimento no aprendizado por parte de Werner e Enrico, com o uso de conexão entre as ideias discutidas e vários indicadores de alfabetização científica, como a classificação de informações (**AC-I1C**), o raciocínio lógico (**AC-I2B**) e o levantamento de hipóteses (**AC-I3A**).

O professor aproveitou então para retomar a questão pertinente do início da aula sobre a concepção de átomo e evidências sobre sua composição. Ele comentou que experimentos para testar a composição só apareceram no final do século XVIII e mostrou um vídeo do experimento da eletrólise da água como exemplo, pedindo que os estudantes fizessem observação sobre ele [MILAM, 2016]. No meio do vídeo, os estudantes Fabiola e Wolfgang tiveram que ir embora e deixaram a sala de aula, enquanto os outros observavam atentamente o vídeo. Werner sugeriu que o vídeo nos mostra como a água é formada por elementos mais simples e que as marcações nos tubos de ensaio indicavam uma proporção de 2 hidrogênios para cada 1 oxigênio, o que demonstra um alto grau de investimento no aprendizado. Foram propostas algumas atividades para os estudantes pensarem sobre essa proporcionalidade e eles concluíram que as leis ponderais da Química seriam uma forte evidência para a teoria atômica. Werner, Marie, César, Peter e Emmy interviram 4, 3, 1, 2 e 2 vezes durante as atividades, respectivamente.

O professor aproveitou para enfatizar como a Ciência funciona através da elaboração de teorias que explicam os fenômenos observados e, além disso, são capazes de realizar previsões que, se verificadas, sustentam ainda mais a teoria em questão. Ele conectou essa fala justamente com o caso das proporções previstas pelas leis ponderais, que acabaram corroboradas em vários testes experimentais. O professor ainda comentou brevemente sobre a lei dos gases e o movimento browniano como outras evidências de que a matéria é feita de átomos.

Em seguida, o professor sugeriu que os estudantes discutissem sobre a divisibilidade do átomo. Nesse momento, o estudante Werner levantou a excelente hipótese de que talvez fosse possível enxergar além do átomo usando a eletricidade. O professor utilizou essa sugestão para introduzir o experimento de Thomson. Ao relatar que Thomson obteve valores para as massas das partículas em análise menores do que a do átomo mais leve conhecido, o átomo de hidrogênio, e que tal resultado não dependia do material das placas metálicas que causavam os desvios dessas partículas, os estudantes Peter e Emmy prontamente disseram que esta seria uma evidência da existência de corpos menores do

que o átomo. O estudante Werner foi além e levantou, corretamente, a hipótese de que esse experimento teria descoberto o elétron. Percebemos como Werner incorporou a sugestão dos colegas Peter e Emmy, e conectou-a à constituição dos átomos por elétrons, trazendo à tona conhecimentos prévios que relacionam a descoberta dessas partículas ao experimento de Thomson.

Discutindo sobre as propriedades do elétron, o professor comentou que eles deveriam sentir a interação gravitacional e se atrair uma vez que possuem uma massa, medida por Thomson. Os estudantes Peter e Emmy questionaram o porquê dessa atração e argumentaram que os elétrons deveriam se repelir, pois têm a mesma carga elétrica, demonstrando autonomia ao trazer novas informações baseadas em noções de eletromagnetismo a partir de conhecimentos prévios adquiridos fora do ambiente escolar<sup>1</sup>. O professor concordou com as informações sobre a repulsão entre partículas de mesma carga elétrica, mas pediu que os estudantes descobrissem o porquê de a repulsão ser maior do que a atração através da análise da lei de Coulomb e da lei da Gravitação Universal de Newton, explorando suas semelhanças e diferenças. A fim de dar uma ideia da magnitude da força elétrica entre duas cargas quando comparada à força gravitacional entre elas, o professor trouxe o simples experimento de um balão de ar, recém friccionado em um material como a lã, que ao ser posicionado acima de nossas cabeças é capaz de levantar nossos cabelos. Ou seja, a força elétrica entre cargas elétricas de um pequeno balão é suficiente para vencer a força gravitacional entre todas as cargas elétricas da Terra. Os estudantes reagiram com alegria quando comentaram já conhecerem esse experimento mas, ainda assim, se mostraram surpresos e disseram que nunca tinham pensado dessa forma. Eles conversaram entre si e manifestaram, através de gestos, uma considerável perplexidade com o fato.

Conectada a essa discussão, para que a perplexidade não ficasse apenas no campo da apreciação do fenômeno, mas sim da construção de novos significados, os estudantes foram expostos a uma situação de diferenciação progressiva. Foram postos a refletir, no último momento da aula, sobre a maior percepção no dia a dia da força mais fraca, a gravitacional, e não a da mais forte, a elétrica, como tinham visto no exemplo do balão, que eles alegaram já conhecer. O estudante Peter, de forma coerente, sugeriu que as cargas opostas deveriam, de alguma maneira, se juntar e se anular, de modo que observamos comumente objetos neutros, enquanto Werner aprofundou ainda mais essa linha de raciocínio ao sugerir que partículas de mesma carga se afastam, formam pólos de cargas iguais com espaços neutros entre elas, e isso deve se repetir indefinidamente, sempre resultando em objetos neutros no nosso cotidiano. Percebemos nas falas dos alunos um alto grau de esforço em desenvolver uma argumentação coerente. Suas falas foram sistematizadas no momento final da aula pelo professor, que enfatizou a importância da

---

<sup>1</sup> Para sustentar essa visão, o professor-coordenador nos relatou que, particularmente, esses estudantes não tinham qualquer familiaridade com o eletromagnetismo a partir da escola, pois encontravam-se na segunda série do ensino médio, e o eletromagnetismo só seria abordado na terceira série.

interação gravitacional para o estudo de objetos praticamente neutros pela Astrofísica e Cosmologia.

No total, observamos 101 intervenções realizadas pelos estudantes ao longo da aula, que contou com 16 momentos e 26 sub-momentos. Para uma sala com dez alunos, isso nos fornece uma média de 10,1 intervenções por estudante, bem como uma média de 6,3 e 3,9 intervenções por momento e sub-momento, respectivamente. No início da aula notamos que apenas os mesmos estudantes se manifestaram: Werner, Enrico, Sonja e César. Inclusive, o estudante Werner foi o mais participativo da aula, com um total de 34 intervenções no total, tendo participado em 19 dos 26 sub-momentos. Além disso, notamos que ele tomou notas e fez diversos registros durante a aula no caderno, demonstrando interesse em investir no próprio aprendizado das mais variadas formas possíveis. Note que a média de intervenções por aluno não reflete bem a excelente participação de Werner.

Especialmente a partir do momento 7, percebemos um maior engajamento de Peter e Emmy, que contribuíram com um total de 12 participações cada, e em 10 e 9 sub-momentos, respectivamente. O estudante César também foi um dos que mais participou, com um total na aula de 11 intervenções em 6 sub-momentos. Já havíamos relatado que, durante o momento 7, os estudantes Fabiola e Wolfgang deixaram a sala de aula, antes de ela completar 15 minutos. Eles participaram em 2 e 5 momentos, respectivamente, e foram os estudantes que menos participaram, junto a Enrico, Sonja, Albert e Marie, que participaram com 5, 6, 4 e 10 intervenções, respectivamente. Enquanto Enrico e Sonja participaram com ideias originais, principalmente no começo da aula, notamos que Albert e Marie participaram apenas respondendo perguntas do professor com respostas diretas, e concordando ou discordando dos colegas. Em particular, o estudante Albert, em todas as suas participações, apenas utilizou respostas diretas de “*sim*” ou “*não*”, e gestos com a cabeça representando essas mesmas respostas. Isso pode sinalizar que o aluno não se sentia à vontade, pois demonstrou insegurança em todas as suas participações. Ele chegou a responder uma pequena frase em uma das perguntas do professor, porém foi inaudível para toda a turma e, quando o docente pediu que ele falasse novamente um pouco mais alto, ele balançou a cabeça negativamente.

Com relação à atividade sobre as leis ponderais, os estudantes que participaram ativamente dela foram Werner, Marie, Peter e Emmy. Dessa forma, eles apresentaram níveis bom e ótimo de participação nas tarefas em sala. No geral, avaliamos que a aula não alcançou uma ótima participação dos alunos uma vez que apenas 4 dos 10 estudantes contribuíram para ela de maneira mais significativa. No entanto, por se tratar da primeira aula da sequência, com uma temática nova e um professor diferente, é natural que os estudantes necessitem de um pouco mais de tempo para se sentirem mais confortáveis a participar.

Com relação aos indicadores de alfabetização científica, observamos uma maior

incidência do indicador de levantamento de hipóteses (**AC-I3A**). Para caracterizá-lo, as operações epistemológicas mais utilizadas foram a indução (**AC-II1**), a dedução (**AC-II2**) e a causalidade (**AC-II3**). Com relação à argumentação, notamos que os estudantes utilizaram mais dados (**AC-III1**) e garantias (**AC-III3**), enquanto os níveis de argumentação mais presentes foram os de nível 0 e 1. Apenas no último momento da aula, quando o estudante Werner explicou a formação de pólos de cargas iguais com o meio delas formando objetos neutros, observamos uma argumentação do nível 3, com o uso de qualificadores.

### • Aula 2: A natureza da luz – Parte I

A segunda aula da sequência contou com a presença de oito estudantes: todos presentes na primeira aula, com exceção de Sonja e César. O primeiro momento, de breve revisão da aula anterior, contou com uma excelente participação de todos os alunos, com exceção do aluno Albert, que já havia participado pouco da primeira aula. Os estudantes lembraram alguns dos tópicos discutidos na aula anterior. Mencionaram o atomismo, o eletromagnetismo, o experimento da eletrólise da água e o elétron como a primeira partícula subatômica descoberta. Também lembraram a ordem cronológica da descoberta da interação eletromagnética após a da interação gravitacional, bem como o fato de a interação gravitacional ser mais fraca quando comparada à interação eletromagnética, mas mais relevante para objetos neutros. Também mencionaram o Modelo Padrão da Física de Partículas.

Ainda que a nossa percepção foi a de que houve pouca participação na primeira aula, como relatamos no término de sua análise, os estudantes foram capazes de mencionar quase a totalidade dos tópicos discutidos nela, abordando alguns de seus detalhes no primeiro momento da segunda aula.

Após esse momento inicial de revisão da aula anterior, o professor sugeriu que os estudantes refletissem sobre as forças atuantes em um problema clássico de plano inclinado e suas origens, voltando ao problema já apresentado brevemente na primeira aula sobre a impossibilidade de penetrarmos nas cadeiras quando sentados. Werner e Enrico mencionaram a força peso e a normal. Quando Werner mencionou corretamente que a força normal seria um efeito do eletromagnetismo, Enrico duvidou e argumentou que ela teria relação com a gravidade, pois geralmente se iguala a força normal com a força peso<sup>2</sup>, o que caracterizamos como um nível argumentativo **AC-IV2**, ainda que o entendimento do aluno não seja correto. Note que esse mesmo aluno tinha sugerido o oposto na primeira aula, ou seja, uma origem eletromagnética para a força normal, concordando com Werner. Nessa aula, ele utilizou uma outra linha de raciocínio para pensar sobre a questão e acabou se confundindo nos conceitos. Werner discordou de Enrico e argumentou que a força eletromagnética é que faz com que haja uma das primeiras características da matéria, que

<sup>2</sup> No caso do plano inclinado, a igualdade se dá entre os módulos da componente vertical da força normal e da força peso. O aluno, porém, não expressou essa informação.

é a impenetrabilidade, enfatizando que a força normal existe pois chega um momento em que “(...) *eles (objetos) tão (sic) muito perto um do outro*” e ocorre a repulsão entre cargas elétricas iguais. Para isso, o aluno Werner conseguiu conectar informações, ideias e hipóteses de outros estudantes, demonstrando um elaborado uso de estratégias e um nível 2 de argumentação (**AC-IV2**). O professor sistematizou reforçando como a maioria das forças do nosso dia a dia têm origem eletromagnética, como a normal e as forças de atrito, ou gravitacional, com ambas se caracterizando por uma ação à distância.

No fim desse primeiro momento, os estudantes se engajaram na compreensão da força de Coulomb para o caso limite de dois elétrons muito próximos, constatando, surpresos, que eles realmente não chegam a se tocar. Cabe ressaltar que aqui foi realizada apenas uma análise qualitativa do caso limite em que a distância entre as duas cargas elétricas torna-se cada vez mais próxima a zero. De acordo com Gil-Perez e Martinez-Torregrosa (1987), citados por [PEDUZZI; LUIZ \[1997\]](#), a utilização de casos limites é extremamente útil não só para detectar resultados incorretos, fixar limites de validade das expressões, mas também para modificar e refletir sobre delineamentos qualitativos, como o que se pretendia nesse momento da sequência.

Em seguida, para iniciar uma conversa sobre o conceito de campo, o professor perguntou aos estudantes como os objetos se comunicam à distância, ao que o estudante Werner respondeu que seria através do campo eletromagnético. O professor concordou e acrescentou também o campo gravitacional. Os alunos se manifestaram de maneira mista. Alguns disseram que já tinham ouvido falar do conceito de campo e outros que não sabiam do que se tratava. De maneira expositiva, o docente introduziu o conceito de campo elétrico, explicando a lei de Coulomb a partir da expressão para o campo elétrico entre duas cargas elétricas. Os estudantes manifestaram entendimento do comportamento das linhas de campo elétrico em duas dimensões quando o professor fez uma analogia dessas linhas saindo de uma carga elétrica com o fluxo de água saindo de um chafariz e escoando por sua borda circular. Os alunos conseguiram facilmente extrapolar a analogia para o caso tridimensional de uma borda esférica, relatando que o comportamento do campo elétrico deveria seguir o inverso da área de uma esfera. Fabiola e Wolfgang, que já haviam saído da primeira aula antes de ela completar 15 minutos, novamente foram embora mais cedo nesse momento da aula, com aproximadamente 25 minutos.

Percebendo que os estudantes se interessaram pela discussão, o professor foi além e comentou sobre a lei de Gauss para o caso de uma carga elétrica com forma qualquer e não apenas a pontual, como abordado na analogia anterior. Até então, apenas cargas elétricas negativas tinham sido utilizadas e os estudantes perguntaram como seriam as linhas de campo no caso de cargas positivas. Para esclarecer essas dúvidas, o professor explorou vários casos, sugeridos pelos próprios estudantes, da simulação [Cargas e Campos \[PhET Simulações Interativas\]](#). O professor introduziu o conceito de campo magnético e sugeriu que os alunos formulassem uma lei semelhante à de Gauss para esse campo. A

primeira tentativa, coerente com as discussões até então, foi a de substituição da carga elétrica da lei de Gauss por uma carga magnética. No entanto, sabemos que ela não é correta e o professor trouxe a informação de que a Natureza era curiosa: não existem cargas magnéticas isoladas das quais campos magnéticos se originam, tais como cargas elétricas que originam campos elétricos. Ele ainda introduziu a nomenclatura científica utilizada para essas supostas cargas magnéticas isoladas: monopolos magnéticos.

A informação de que tais cargas não existem não exauriu as dificuldades no entendimento dos estudantes nesse momento. Eles não conseguiram relacionar de imediato a substituição na lei de Gauss da carga elétrica por uma carga magnética nula para dar conta de sua inexistência. Werner e Peter primeiramente sugeriram que a carga elétrica pudesse ser substituída por uma constante. O professor provocou ao pedir uma explicação sobre o porquê de essa hipótese e eles não souberam argumentar. O professor então enfatizou que não existem tais tipos de cargas e pediu novamente que refletissem sobre o que a inexistência delas implicaria se pudessem usar uma carga nula na lei de Gauss já discutida. Peter acabou por sugerir, corretamente, que no lugar da carga elétrica teríamos que colocar apenas um zero, anulando essa parte da expressão, o que foi confirmado pelo professor. Ainda assim, vários estudantes, incluindo o próprio Werner, ficaram surpresos com a simplicidade da lei e perguntaram se seria só isso mesmo. A apresentação da inexistência de monopolos magnéticos se deu de maneira natural devido ao interesse dos estudantes quando a lei de Gauss foi introduzida. Um passo além foi dado na direção de apresentar também as outras equações de Maxwell em suas devidas formas qualitativas. No entanto, a abordagem sobre a inexistência de monopolos magnéticos foi, de fato, bastante curta, apenas através de comentários expositivos, sem promover questionamentos para os estudantes. Pensamos ser essa a causa da dificuldade dos alunos e sugerimos que fosse pensada uma nova forma de introduzir essa informação de maneira menos expositiva, a fim de alcançar uma resignificação dos conhecimentos prévios e/ou adquiridos pelos estudantes quando a lei de Gauss foi discutida.

Em seguida, uma vez que não possuíam os ferramentais matemáticos diferenciais e integrais, os estudantes foram estimulados a formular as outras equações de Maxwell de maneira simplificada, fazendo uso do domínio conceitual das grandezas envolvidas para sugerir suas expressões. Os estudantes Werner e Marie ainda relacionaram o campo elétrico ao magnético, reafirmando uma fala anterior do professor de que os dois campos poderiam ser vistos como uma coisa só: o campo eletromagnético.

A partir dessa unificação no campo eletromagnético, o professor aproveitou para introduzir o conceito de ondas eletromagnéticas, mostrando a simulação de uma carga elétrica se movendo [[Irradiando Carga](#), [PhET Simulações Interativas](#)], e propondo que os alunos refletissem sobre o que gerava as ondas em questão. Enrico levantou a hipótese de que elas estariam relacionadas ao movimento do próprio campo e seriam então responsáveis pela comunicação entre as cargas, enquanto Marie observou que as ondas vão se espalhando. O

professor usou uma segunda simulação ([[Ondas de Rádio e Campos Eletromagnéticos, PhET Simulações Interativas](#)]) da propagação dessas ondas através de antenas de transmissão e provocou os estudantes a pensarem sobre os *delays* nas transmissões de televisão. Houve bastante engajamento nesse momento, em que os estudantes comentaram suas observações sobre a simulação e fizeram reflexões, com Peter destacando que a transmissão não é imediata, ou seja, quando vemos o repórter falando, ele já está, na realidade, uma fala na frente. Nesse momento, percebemos neste aluno uma excelente organização das informações, um bom uso do raciocínio lógico e uma capacidade argumentativa no nível 1 (AC-IV1). Peter ainda propôs algumas perguntas, como o porquê de duas televisões muito próximas em sua casa quando sintonizadas no mesmo canal nunca conseguirem transmitir simultaneamente. O entrosamento entre os estudantes era nítido, com Werner e Marie propondo explicações para a pergunta de Peter, gerando um excelente momento de conversa entre eles, que culminou com uma pequena discussão sobre outras aplicações das ondas eletromagnéticas.

Quando o professor mostrou que o valor encontrado por Maxwell para a velocidade das ondas eletromagnéticas era igual ao da velocidade da luz já conhecida por medidas astronômicas, os alunos ficaram surpresos com a rapidez de propagação, e Werner fez a brilhante conexão de que a luz seria então uma onda eletromagnética, chegando em uma conclusão precisa com autonomia.

O professor aproveitou para perguntar aos estudantes o que são ondas e quais são as grandezas que as caracterizam. O professor-coordenador na escola aproveitou para estimular os alunos da segunda série, quando geralmente são abordados tópicos de Física Ondulatória, ao dizer que eles estavam estudando justamente a matéria de ondas naquele trimestre. Eles elaboraram diversas hipóteses. O professor ajudou deixando a dica de que são três propriedades. Werner comentou sobre atração e reflexão, enquanto Marie, Peter e Emmy discordaram dizendo que essas não seriam propriedades, lembrando uma aula de laboratório que tiveram recentemente. Por fim, chegaram nas propriedades: amplitude, comprimento e frequência. O momento foi bastante descontraído e os alunos se divertiram tentando lembrar o que já tinham visto em outra ocasião.

No momento seguinte, o professor aproveitou para abordar o espectro eletromagnético e comentou sobre as diversas frequências, os tipos de ondas, e a faixa visível desse espectro. Quando o professor comentou sobre o tipo de ondas de micro-ondas, o estudante Werner disse que as ondas eletromagnéticas eram capazes de esquentar a água, e o professor aproveitou para explicar o funcionamento do aparelho de micro-ondas a partir da oscilação das moléculas de água que compõem os alimentos, que acaba por gerar aumento da temperatura suficiente para esquentar os alimentos. Fazendo uso das falas de Werner e do professor, Marie complementou “*E faz a pipoca.*”, ao passo que Peter comentou “*A pipoca tem muita água.*”. Os estudantes começaram a rir e interagiram entre si imitando o estouro da pipoca, com Peter, surpreso, finalizando o momento com “*Eu não*

*sabia disso.*”. Os estudantes demonstraram um excelente nível de autonomia, engajando em uma conversa que lhes motivou à descoberta coletiva de novas informações.

Durante as aulas percebemos aspectos inspirados na perspectiva pedagógica sociocultural de Lev Vygotsky, que parte da ideia fundamental de que o conhecimento é uma produção social. São as interações sociais promovidas em sala de aula e realizadas com a participação do professor, que domina cognitivamente o conteúdo objeto de ensino, que fomentam o desenvolvimento dos próprios alunos. A dimensão dialógica entre estudantes e professor a partir das interações sociais em sala de aula promove, por meio dos signos, da linguagem e dos diagramas utilizados pelo professor, uma negociação de significados, que é fundamental para o processo de construção coletiva e cultural do conhecimento, como apontam [OSTERMANN; CAVALCANTI \[2010\]](#). Portanto, ressaltamos o papel fundamental do estímulo às interações e da dialogicidade adotada pelo professor em sala de aula para a efetividade de nossa proposta.

Cabe ressaltar que vídeos e simulações com fenômenos que geram efeitos à primeira vista de fascinação aos olhos dos estudantes não eram apenas apresentados para observação, mas havia toda uma discussão orientada e fundamentada pelo professor para transformar esses efeitos em novos significados aos alunos. Estes ampliavam ou ressignificavam seus conhecimentos prévios. Do contrário, como o filósofo e epistemólogo Gaston Bachelard notou, tais observações fantásticas produziram apenas falsos centros de interesse ou obstáculos epistemológicos, que acabam por dificultar a aprendizagem dos estudantes e se valem apenas do impacto emocional sem reflexão para causar uma falsa impressão de aprendizado. Como o próprio Bachelard se refere [BACHELARD \[2005\]](#),

É no eixo experiência-razão e no sentido da racionalização que se encontram ao mesmo tempo o risco e o êxito. Só a razão dinamiza a pesquisa, porque é a única que sugere, para além da experiência comum (imediate e sedutora), a experiência científica (indireta e fecunda). ([BACHELARD \[2005\]](#), p. 22)

Ele complementa

A primeira experiência ou, para ser mais exato, a observação primeira é sempre um obstáculo inicial para a cultura científica. De fato, essa observação primeira se apresenta repleta de imagens; é pitoresca, concreta, natural, fácil. Basta descrevê-la para se ficar encantado. Parece que a compreendemos. ([BACHELARD \[2005\]](#), p. 25)

Certamente uma abordagem pedagógica que permanecesse apenas no campo da observação não seria coerente com a adoção de uma perspectiva pedagógica que visa a alfabetização científica dos estudantes.

Foi interessante notar como o engajamento bastante acentuado desses momentos anteriores de maior interação entre os estudantes durante a aula perdurou até o final dela,

em particular nos dois últimos momentos em que o professor abordou como a maior faixa de luz emitida pelo Sol ocorre justamente no intervalo de frequência visível ao olho humano e na cor verde refletida pelas plantas. Quando o professor perguntou se os estudantes achavam que isso seria apenas uma simples coincidência, os estudantes Werner e Marie se manifestaram relacionando esses exemplos à teoria da evolução, e Peter complementou com o nome de Darwin. Werner e Marie disseram que evoluímos para enxergar nessa faixa de maior emitância e não estaríamos aqui se não enxergássemos nada. O professor comentou ainda que a maior parte da luz emitida pelo Sol ocorre na faixa do verde, que é justamente a faixa de maior rejeição pelas plantas e a cor que elas mais refletem e que, por isso, são verdes. Werner comentou com autonomia que elas poderiam até absorver essa maior quantidade de luz na faixa verde, mas superaqueceriam, o que, definitivamente, não seria vantajoso para elas. Ele ainda comentou sobre uma teoria sobre plantas que se comportavam dessa forma e eram roxas. O professor sistematizou a discussão dizendo que as plantas existentes atualmente evoluíram justamente para absorver nas cores em que as plantas roxas rejeitavam e acabaram se adaptando melhor, sem morrerem por superaquecimento. Todos os estudantes, com exceção de Enrico e Albert, participaram ativamente das discussões nesses momentos.

A interdisciplinaridade, como o exemplo com a Biologia dos dois últimos momentos da aula, é fundamental para articular assuntos fragmentados pela divisão escolar dos conteúdos em disciplinas. Em particular, o caráter de integração e elo do conteúdo a partir do diálogo entre várias áreas científicas enfatiza a relevância maior do pensar e do fazer ciência em detrimento ao conhecimento fragmentado, fruto de tópicos apresentados na perspectiva de disciplinas curriculares soltas e desconexas. A importância dessas relações é que o aluno seja estimulado a fazer conexões entre as mais diversas áreas, pois assim fomentam-se novos saberes e conhecimentos multifacetados. Além disso, quanto mais conceitos, proposições, ideias, esquemas e modelos, puderem ser organizados e relacionados, em perspectivas disciplinares diversas, mais conexões são desenvolvidas na estrutura cognitiva dos alunos, facilitando a aprendizagem dos conteúdos-objetos de estudo.

Ao todo foram 151 intervenções na aula, um aumento considerável de aproximadamente 50% quando comparado ao total de intervenções na primeira aula. Ainda mais notável é que, como 8 alunos estiveram presentes, a média de intervenções foi de 18,9 por aluno, quase o dobro da aula anterior. Apesar de significativo, esse número, no entanto, novamente não reflete as intervenções de Werner, o mais participativo em sala de aula com 64 intervenções no total, e participação em 20 dos 23 sub-momentos. Tampouco a média de intervenções descreve bem o número de intervenções dos alunos que participaram menos da aula, Fabiola, Albert e Wolfgang, com apenas 1, 2 e 3 intervenções, respectivamente. Cabe ressaltar que Fabiola e Wolfgang estiveram presentes apenas nos primeiros 25 minutos de aula.

Com 16 momentos e 23 sub-momentos, contabilizamos 9,4 e 6,6 intervenções por

momento e sub-momento, respectivamente. Marie, Peter e Emmy participaram ativamente da aula, com 27, 32 e 19 intervenções no total. Os que menos participaram foram Enrico, com 4 intervenções em 3 sub-momentos diferentes, e Albert, como já mencionamos, que participou apenas de 2 sub-momentos. A participação de Enrico foi semelhante à da primeira aula ao passo que Albert deixou de se manifestar somente com “*sim*” ou “*não*”, mas ainda assim suas duas intervenções foram apenas com respostas curtas às perguntas do professor. No entanto, já percebemos um maior engajamento emocional de Albert, pois ria e conversava com os outros alunos.

Em termos de engajamento cognitivo, notamos uma melhoria da autonomia e do uso de estratégias por parte dos alunos. Os indicadores de alfabetização científica mais presentes foram: seriação de informações (**AC-I1A**) no momento de revisão da primeira aula, raciocínio lógico e proporcional (**AC-I2A** e **AC-I2B**), levantamento e teste de hipóteses (**AC-I3A** e **AC-I3B**), previsão (**AC-I3D**) e explicação (**AC-I3E**). Estas ações foram caracterizadas em sua maioria por indução (**AC-II1**), dedução (**AC-II2**), apelo à analogia e ao exemplo/protótipo (**AC-II3**), consistência com outro conhecimento (**AC-II7A**) e plausibilidade (**AC-II8**). Notamos uma maior incidência de operações de argumento com dados (**AC-III1**), conclusão (**AC-III2**) e garantias (**AC-III3**), em que os níveis 0 e 1 de argumentação foram os mais comuns. Houve apenas duas incidências no nível 2 e também duas no nível 3.

### • Aula 3: A natureza da luz – Parte II

Na terceira aula da sequência estiveram presentes sete estudantes. Seis deles já haviam frequentado as duas primeiras aulas, enquanto Richard, o sétimo estudante, participou pela primeira vez da sequência de aulas. Como ele chegou na sala junto aos alunos Werner e Emmy, e parecia estar bastante enturmado com eles, cogitamos a hipótese de ele ter comparecido a essa aula devido à influência direta dessas colegas. Independentemente disso, pensamos que a presença de novos alunos no decorrer da sequência demonstra que os alunos que estiveram presentes nas aulas até então se sentiram motivados com elas, pois possivelmente fizeram comentários sobre elas em outros momentos durante o dia a dia escolar, o que acabou por despertar a atenção de novos estudantes. Sonja, César, e os estudantes que saíram no decorrer da primeira e da segunda aula, Fabiola e Wolfgang, não estiveram presentes nessa terceira aula.

O professor iniciou a aula com a pergunta “*O que é a luz?*”, ao que Werner e Peter responderam “*É uma onda eletromagnética.*”. Werner e Enrico complementaram a resposta ao dizer que é devido à propagação do campo eletromagnético unificado que se percebe a luz e, junto à Marie, comentaram sobre algumas características das ondas eletromagnéticas e os experimentos e simulações abordados na aula anterior. Werner lembrou a discussão sobre o espectro eletromagnético e Peter a relacionou à teoria da evolução. Os estudantes

comentaram sobre a relação das cores com a frequência. Da mesma forma que o ocorrido na segunda aula, também percebemos que os estudantes mencionaram quase a totalidade dos tópicos discutidos na aula anterior, com ampla participação da maioria dos estudantes. No entanto, como era esperado, Richard, o estudante que esteve presente pela primeira vez nas aulas da sequência justamente nessa terceira aula, não participou desse momento. Albert e Emmy apenas interagiram conversando com Marie em duas breves conversas, mas não se manifestaram explicitamente com a turma sobre a aula anterior.

Em seguida, o professor instigou que os alunos refletissem sobre o conceito de onda e o de partícula em termos dos padrões de interferência entre ondas e entre partículas, propondo que investigassem situações ilustradas em vídeos, animações e imagens do experimento de fenda dupla [SIEGEL, 2019]. Essa foi uma atividade realizada em sala de aula que contou com 6 intervenções de Werner, 2 de Marie, 2 de Peter e 1 de Emmy.

Os estudantes relataram interferências construtiva e destrutiva para ondas, bem como o padrão pontual no caso de partículas. O professor desenhou o aparato da fenda dupla com uma folha de detecção e perguntou se alguém gostaria de ir ao quadro para desenhar os padrões levantados pela turma, ao que Werner se voluntariou prontamente. Nesse momento, apenas Albert e Richard não se manifestaram. O professor relatou que, quando (Thomas) Young realizou o experimento da fenda dupla com a luz, ele obteve um padrão de interferência de ondas. O docente então propôs que os estudantes se manifestassem sobre o padrão que eles esperavam se formar no caso do uso de luz de baixíssima intensidade, e mostrou uma das animações em [SIEGEL, 2019] para estimular a discussão na qual a intensidade do feixe de luz é reduzida aos poucos, até que ele pausa a animação. Os estudantes comentam que o perfil parece o de estrelas, são pontinhos, alguns locais com mais e outros com menos pontos, ao que Werner, Enrico e Peter então concluem que o padrão é indicativo de partículas. Enrico demonstrou surpresa. Depois dessa discussão, o professor apresentou o conceito de onda-partícula, com os fótons como as partículas de luz. Os alunos, visivelmente empolgados, fizeram perguntas sobre as características dos fótons. Perguntaram, por exemplo, se ele tem ou não massa, explorando até tópicos de outras áreas, como a Cosmologia, quando perguntaram “(...) *como é que o buraco negro captura luz já que a luz não tem massa?*”. As perguntas em destaque foram feitas por Enrico e Werner e percebemos uma ótima autonomia por parte deles, buscando ir além do discutido.

Quando o professor mostrou o caso do elétron na fenda dupla, relatando que ele também é uma onda-partícula, os alunos ficaram extremamente surpresos e Werner ainda exclamou “*Ele atravessa a matéria!*”. O professor aproveitou para associar a discussão com o microscópio eletrônico, explicando seu funcionamento. Em seguida, o docente estimulou o entendimento dos alunos do conceito de onda-partícula a partir de uma discussão sobre trajetórias para as partículas subatômicas e o fato de que, quando enxergamos, acabamos por alterar as coisas que nos cercam. Dessa forma, os alunos perceberam a necessidade

de uma nova formulação da Mecânica para as partículas subatômicas devido ao fato de a discussão tê-los levado à conclusão de que não há mais uma noção de trajetória para essas partículas, o que culminou no direcionamento da aula para uma breve introdução da Mecânica Quântica. Cabe ressaltar que, nesse momento, Richard fez sua primeira participação perguntando se a intensidade da luz teria relação com alguns dos problemas de visão, buscando trazer a temática para situações do cotidiano.

É fundamental que o docente leve em consideração os interesses e os desejos demonstrados pelos estudantes, e esteja preparado para adaptar suas aulas e abordá-los. Foi o caso nessa aula, quando os próprios alunos acabaram por direcionar a aula para uma breve introdução à Mecânica Quântica. Além disso, percebemos como os próprios alunos demonstram a necessidade de conectar as ideias discutidas com o cotidiano por eles vivenciado. Na fundamentação teórica deste trabalho destacamos os eixos estruturantes da alfabetização científica. O primeiro deles, a compreensão básica de termos, conhecimentos e conceitos científicos fundamentais, vem à tona justamente em situações como essa, cuja importância aparece precisamente para possibilitar um maior entendimento de informações e situações do dia a dia tornando os alunos seres autônomos no mundo.

Dessa forma, o professor aproveitou o interesse dos estudantes para aprofundar um pouco mais as noções de Mecânica Quântica, uma vez que várias delas são também relevantes para introduzir e facilitar o entendimento de conceitos da Física de Partículas. Como exemplo, o professor comentou sobre a relação de de Broglie, enfatizando o papel da constante de Planck como uma das constantes fundamentais da Natureza. Ela é relevante para discutir, posteriormente, a necessidade energética dos processos físicos que aparecem na Física de Partículas. Nesse momento, Werner aproveitou para lembrar, por conta própria, outros exemplos de constantes fundamentais, como a constante de Newton da Gravitação, demonstrando autonomia. Além disso, ele também demonstrou entendimento sobre conversão de medidas quando fez uma pergunta sobre a velocidade da luz em outras unidades.

Nesse momento, foi interessante notar o distanciamento dos estudantes para com os cientistas que dão nome às expressões e às constantes físicas. Quando Richard perguntou sobre o nome de Planck, Emmy comentou “*Nunca é João e Maria. É sempre um nome estranho.*”, o que provocou risos e comentários que aderiam a essa visão por parte dos outros alunos. O professor relatou que é comum que as expressões e constantes recebam os sobrenomes de quem as formulou. Os alunos questionaram se fosse um brasileiro o responsável por dar nome a alguma fórmula ou constante, se ele então seria “constante de Pereira” ou “constante de Silva”. Aqui percebemos também uma identificação dos alunos para com o professor-coordenador na escola, que é o professor de Física no dia a dia dos meninos e das meninas sujeitos-participantes dessa pesquisa. Os sobrenomes que os alunos levantaram remetem justamente ao do professor-coordenador. Essa abertura entre estudantes e professor é fundamental para o estabelecimento de diálogos e interações

que auxiliam o processo de ensino-aprendizagem, como percebemos ser o caso com os estudantes envolvidos na pesquisa e o professor de Física do dia a dia deles.

Para introduzir os diagramas de Feynman tão usuais na Física de Partículas, o professor pediu que os alunos primeiramente relembassem sobre o campo eletromagnético e o conectou aos fótons, introduzidos no começo da aula. O primeiro exemplo de diagrama de Feynman foi o da interação entre dois elétrons que, ao trocarem um fóton, sofrem um desvio. Richard perguntou se os elétrons estariam sempre se repelindo, ao que o professor respondeu positivamente, pois é justamente essa troca de fótons que faz com que eles sejam repelidos. O docente então aproveitou para associar o fóton ao conceito de mediador da interação eletromagnética. Em seguida, o professor introduziu o antielétron, a antipartícula do elétron, de mesma massa e outras características, mas com carga oposta à do elétron. Werner imediatamente associou o termo “antipartícula” ao de “antimatéria”, comentando que esse seria um exemplo dessa última forma de matéria. O professor aproveitou para mencionar que o antielétron é mais conhecido como pósitron, e comentou sobre como ele foi descoberto por previsão teórica antes de ser observado experimentalmente, dando ênfase ao poder preditivo de teorias científicas e como essas previsões teóricas são capazes de nos guiar para novas descobertas. Pensamos que discussões sobre o poder preditivo de teorias científicas são fundamentais para que os estudantes as distingam de mitos, e fizemos questão de então incluir, na sequência proposta, diversos momentos como esse que abordaram aspectos sobre o funcionamento da Ciência.

Em seguida, quando o professor abordou a aniquilação matéria-antimatéria, Werner levantou a hipótese, correta, de que no caso do elétron e antielétron a aniquilação deveria gerar fótons, e Richard demonstrou dúvidas com relação ao termo aniquilação, que foi esclarecido pelo professor. Enrico, por sua vez, ficou confuso quanto à existência ou não de trajetórias, e perguntou como podemos dizer que as partículas desapareceram se não observamos suas trajetórias. O professor esclareceu essa dúvida usando o princípio da incerteza de (Werner) Heisenberg e mencionou que não observamos uma trajetória, mas sim uma região de possível existência para as partículas subatômicas, como se fosse um túnel, o que pareceu satisfazer os alunos. Eles ficaram visivelmente surpresos quando o professor mencionou que uma interpretação para a antipartícula é a de uma partícula andando para trás no tempo, o que inicialmente gerou uma certa confusão nos alunos, esclarecida quando o professor abordou o processo oposto ao da aniquilação elétron-pósitron: a criação de um par elétron-pósitron.

Motivado pela pergunta de Werner “(...) como é que o fóton...ele produz o elétron sendo que o fóton não tem massa e o elétron tem?”, o professor introduziu a relação massa-energia de Einstein, comentando que o fóton, ao atingir a energia suficiente, pode então produzir um par elétron-pósitron. Além de mostrar entendimento de diversos conceitos abordados até então, o estudante demonstrou que avalia a plausibilidade das informações e investe em seu aprendizado, buscando ir além do básico ao conectar ideias. Como ele utilizou

dados em disputa com a presença de refutadores, a argumentação do aluno demonstrou um nível hierárquico 3 (**AC-IV3**). De fato, no exemplo, o aluno explorou condições para que a conclusão de que o fóton é capaz de gerar o par não fosse válida. Quando o professor abordou os funcionamentos do raio-X e da tomografia *PET-scan*, e expôs suas relações com as discussões da aula, os estudantes aproveitaram para fazer perguntas sobre os perigos desses dois procedimentos e demonstraram um alto grau de engajamento. Novamente, nesse momento, percebemos a curiosidade em compreender situações cotidianas vivenciadas pelos próprios alunos ou por seus colegas e familiares, corroborando como a perspectiva freireana de trazer as discussões para a realidade complexa dos educandos é capaz de engajá-los.

Contabilizamos um total de 122 intervenções na aula, com uma média de 17,4 intervenções por aluno, número próximo à média observada na segunda aula. Com 17 momentos e 31 sub-momentos, foram 7,2 e 3,9 intervenções por momento e sub-momento, respectivamente. Novamente, a média não reflete a realidade do aluno mais participativo e do que menos participou, os casos de Werner e Albert, respectivamente. Werner participou com 61 intervenções, em 23 dos 31 sub-momentos. Já Albert participou apenas 1 vez. Sua única participação foi para confirmar entendimento sobre o experimento de fenda dupla. Novamente, notamos que ele ainda não se sente confortável e prefere fazer comentários sobre a aula para os colegas que se sentam mais próximos a ele do que expô-los para toda a turma.

O estudante Richard, que esteve presente em sua primeira aula da sequência, foi o segundo aluno mais participativo, com 17 intervenções no total, tendo participado em 8 sub-momentos. Enrico, Marie, Peter e Emmy também participaram bem da aula, com 7, 11, 8 e 16 participações, respectivamente. Ainda que o número de participações de Enrico não tenha sido tão elevado, ele fez duas perguntas que geraram dois momentos de discussões frutíferas para toda a turma. A primeira pergunta realizada foi se os fótons têm ou não alguma massa, enquanto a segunda foi sobre o que as trajetórias nos diagramas de Feynman indicavam uma vez que advêm de um formalismo quântico que não permite mais discussões em termos de trajetórias.

Percebemos uma melhoria do investimento no aprendizado e um maior desejo de ir além do básico com relação ao engajamento cognitivo dos alunos. O indicador de alfabetização científica mais presente foi o de explicação (**AC-I3E**), caracterizado pelas operações epistemológicas de indução (**AC-II1**), compromisso com consistência (**AC-II7D**) e plausibilidade (**AC-II8**). Houve uma maior incidência das operações de argumento com dados (**AC-III1**), conclusão (**AC-III2**) e garantias (**AC-III3**), em que os níveis de argumentação 0 e 1 foram novamente os mais comuns, mas a argumentação no nível 3 ocorreu seis vezes durante essa aula, com o uso tanto de qualificadores como de refutadores.

### 3.1.2 Aulas 4 e 5: Física Nuclear

#### • Aula 4: Física Nuclear – Parte I

A quarta aula da sequência iniciou um bloco de aulas sobre outro ramo da Física de Partículas, a Física Nuclear. Nela estiveram presentes seis estudantes. Richard, que participou pela primeira vez na terceira aula, não compareceu desta vez. No entanto, uma colega de Werner, a quem chamaremos de Chien, compareceu pela primeira vez. Fabiola e Wolfgang, que deixaram a primeira e a segunda aula antes do término delas e não compareceram na terceira aula, voltaram a comparecer na presente aula, enquanto os outros estudantes presentes já haviam frequentado todas as outras três aulas integralmente.

Já no primeiro momento, de breve revisão da aula anterior, além da participação de Werner e Marie relembando diversos tópicos envolvendo fótons, elétrons e antimatéria, percebemos também as primeiras participações mais expressivas de Albert, o que até então não havia ocorrido. Foram quatro intervenções de Albert nesse momento e ele foi o primeiro a lembrar que o pósitron é um exemplo de antipartícula. Ele o relacionou com a interpretação de um elétron andando para trás no tempo e também com a interpretação de que ele aparenta roubar um elétron, ambas interpretações discutidas na aula anterior. Albert continuou a trocar ideias com outros colegas mais próximos, como nas aulas anteriores, mas já demonstrou uma certa perda da inibição e um maior grau de confiança em si mesmo ao se manifestar para toda a turma.

Para sistematizar alguns conceitos da aula anterior, o professor propôs que os estudantes pensassem porque efeitos relativísticos e quânticos não são visíveis no nosso cotidiano. Para isso, ele pediu que os estudantes refletissem sobre as velocidades às quais estamos habituados quando comparadas à velocidade da luz, e sugeriu que pensassem inicialmente sobre o comprimento de onda emitido por um objeto do cotidiano, com uma massa de 1 quilograma e uma velocidade de 1 m/s, relembando a relação de de Broglie. Os estudantes não participaram muito com falas nesse momento, mas alguns fizeram anotações no caderno e apenas confirmavam ou discordavam de falas do professor.

Para iniciar a temática central dessa quarta aula, de introdução às subestruturas do núcleo atômico, o professor lembrou o átomo de Thomson. Em seguida, ele comentou sobre como Rutherford teve a ideia, implementada por seus estudantes de doutorado Geiger e Marsden, de um experimento que pudesse testar a composição do átomo de Thomson. A proposta do experimento foi apresentada em termos de conceitos já conhecidos dos alunos, como a energia cinética e a potencial, enquanto os estudantes Fabiola e Wolfgang novamente deixaram a aula com, aproximadamente, 20 minutos. Além disso, o professor comentou sobre as partículas alfa altamente energéticas e de carga positiva lançadas em direção ao átomo que, de acordo com Thomson, deveria ser uma esfera de carga positiva de  $10^{-10}$  m de raio. Em conjunto com os estudantes, o professor elaborou uma equação no quadro relacionando as energias inicial e final para obterem a velocidade final esperada das

partículas alfa, caso o átomo de Thomson estivesse correto. Werner perguntou se seria a partir desse cálculo que apareceria o desvio dessas partículas, complementando sua fala ao trazer uma nova informação ou relembra-la à turma com autonomia: a de que uma delas desviou muito mais do que o esperado. O professor concordou com Werner, sistematizou as observações de Geiger e Marsden, que executaram o experimento pensado por Rutherford, e mostrou a curva esperada do número de partículas alfa desviadas a diversos ângulos para o átomo de Thomson, bem como os pontos experimentais obtidos pelos alunos de Rutherford. O professor enfatizou que a discrepância entre a curva esperada para o átomo de Thomson e a curva dos pontos experimentais obtidos mostrou que algo não estava correto na descrição do átomo por Thomson. Esse comportamento foi ressaltado pelo professor, pois é comum na Ciência que, quando as previsões de um determinado modelo não condizem com as observações, cientistas devem repensar suas perspectivas com relação à situação investigada.

O professor continuou comentando como Rutherford teve a ideia de diminuir o raio da esfera positiva, colocando-a em um núcleo atômico de raio muito menor do que o raio do átomo de  $10^{-10}$  m, ao redor do qual os elétrons orbitariam. No entanto, ele enfatizou que Rutherford supôs que o núcleo fosse pontual. Os estudantes manifestaram entendimento de que assim existiria a possibilidade de que as partículas alfa freassem, desviando em diversos ângulos como o mostrado pelos pontos experimentais e, inclusive, voltassem na mesma direção que a inicial, em um desvio de um ângulo de  $180^\circ$ .

No momento seguinte, o professor introduziu a ideia de (James) Chadwick, que em 1932, propôs que o núcleo não seria pontual como Rutherford pensou, mas sim constituído de outras subestruturas. Werner levantou a hipótese de que tais subestruturas do núcleo são chamadas de nêutrons, e o professor acrescentou dizendo que, na realidade, são prótons e nêutrons. O docente aproveitou para lançar um desafio aos estudantes. Ele perguntou como o núcleo não se desintegra, uma vez que os nêutrons são neutros e os prótons, de carga elétrica positiva, tendem a se repelir.

Marie tentou explicar a estabilidade do núcleo a partir de uma correspondência entre as cargas dos prótons, dos nêutrons, e dos elétrons que orbitam o núcleo e suas distâncias. O professor comentou que isso não seria suficiente, pois a carga elétrica negativa do elétron ajudaria, na realidade, a atrair os prótons para fora do núcleo, piorando a situação da estabilidade. Werner, organizando as informações apresentadas pelo professor e colegas, e fazendo uso do raciocínio lógico, levantou a hipótese de que o núcleo seria formado por ainda outras partículas. Ele então apresentou uma justificativa para a estabilidade do núcleo, baseada na mesma ideia inicial de Marie, a de cargas elétricas, mas agora a partir de interações entre as partículas que formariam os prótons e os nêutrons.

O professor encorajou o aluno a continuar se expressando, dizendo que ele se encontrava em um caminho muito bom de raciocínio. Werner disse que se lembrou da tabela

que o professor mostrou na primeira aula com as partículas do Modelo Padrão, quando este foi apenas brevemente mencionado e foi dito que os alunos se aprofundariam nessa temática na sequência de aulas, demonstrando tentativa de consistência com conhecimento anterior e apelo à tabela mostrada pelo professor. Marie aproveitou para bater fotos dos slides, demonstrando autonomia em registrar a discussão e os dados em sala de aula a partir de múltiplos meios.

Assim, o professor construiu junto aos alunos a necessidade da existência de uma outra interação, que eles ainda desconheciam, mas que ajudaria na atração entre as partículas do núcleo a fim de mantê-lo coeso. O professor provocou o porquê de a interação gravitacional não ser responsável por essa atração, ao que Albert justificou dizendo que ela é ainda mais fraca do que a interação eletromagnética de repulsão entre cargas iguais e não seria suficiente para dar conta da estabilidade. Portanto, a conclusão dos alunos foi a de que, de fato, deve existir uma terceira interação, além da eletromagnética e da gravitação para vencer a própria repulsão eletromagnética. O professor a apresentou como interação forte. Albert aproveitou para perguntar se o professor ainda falaria sobre a interação fraca, demonstrando um grande interesse em ir além do básico e uma vontade própria em pesquisar sobre outras temáticas que geralmente não são discutidas no contexto do dia a dia da sala de aula. Isso corrobora nossa visão de que é preciso mudar a postura da docência em Física no ensino médio, incorporando temáticas mais atuais da Física Moderna e Contemporânea, pois elas parecem ser capazes de motivar os alunos para a Física mais do que temáticas tradicionais.

Em seguida, o professor comentou sobre como a Ciência se desenvolve. Os cientistas buscam a toda hora criar soluções para os problemas em aberto. Quando elas aparecem e se mostram eficazes, surgem novos problemas para os quais novas soluções devem ser buscadas. Para enfatizar esse desenvolvimento científico, o docente comentou como a existência da interação forte resolveu o problema da coesão do núcleo atômico, mas deixou um problema em aberto: o fato de que não percebemos essa interação no nosso dia a dia. Ele disse que esse problema seria abordado mais para frente em uma das aulas da sequência.

No último momento da aula, o professor estimulou uma discussão comparativa entre as interações eletromagnética, gravitacional e forte. Para isso, relembrou o comportamento das interações eletromagnética e gravitacional com o inverso do quadrado à distância entre os corpos, classificando-as como de longo alcance, e mencionou que a interação forte seria bem diferente, de curto alcance. Ele questionou os alunos sobre o que isso significaria e, para iniciar a discussão, propôs que eles pensassem em termos dos mediadores das interações eletromagnética e gravitacional, os fótons e os grávitons, respectivamente. Estimular esse pensamento relacional entre os tópicos abordados em sala de aula é sempre muito frutífero, pois assim percebe-se como a Ciência não é um apanhado de blocos temáticos desconexos entre si, mas que pode-se explorar relações entre tudo o que vemos e aprendemos. Dessa

forma, os alunos são estimulados a ampliar suas visões, fazendo com que suas estruturas cognitivas também sejam ampliadas.

Dando continuidade ao último momento da aula, Werner comentou que os mediadores das interações eletromagnética e gravitacional não possuem massa e levantou a hipótese de que, no caso da interação forte residual, talvez o seu curto alcance pudesse ser explicado em termos de partículas massivas formando os prótons e os nêutrons, que ele pensou serem os mediadores da interação forte residual. A hipótese não está totalmente correta pois, como veremos nas próximas aulas, os quarks que formam os prótons e os nêutrons não são os mediadores da interação forte. No entanto, o simples fato de o estudante ter levantado a hipótese de que o alcance das interações está relacionado de alguma forma à massa de seus mediadores demonstra um alto grau de investimento no aprendizado. A relação do curto alcance com a massa dos mediadores da interação é correta. No entanto, como o próprio professor comentou, deveria ter sido aplicado aos píons, os mediadores da interação forte residual entre prótons e nêutrons, e não entre seus quarks constituintes. O professor desenhou um diagrama de Feynman típico para essa interação. Werner concluiu, ao observar o diagrama, que o próton e o nêutron parecem estar sempre se relacionando, um sendo transformado no outro, comportamento que foi confirmado pelo professor.

Quando o professor comentou que um dos responsáveis pela descoberta do pión foi o brasileiro (César) Lattes, os alunos ficaram bastante surpresos, emitindo falas exclamatórias como “*Nossa! Mas é sério?*”. O professor aproveitou para mencionar que, no futuro, os alunos possivelmente se deparariam com o nome dele, pois a maior plataforma de currículos no Brasil recebeu o nome do Lattes em sua homenagem: o currículo Lattes. Os estudantes riram, Marie comentou “*Descobriu o pión e agora é só um currículo.*”, enquanto Werner comentou “*O Brasil sabe valorizar as pessoas.*”, claramente em tom sarcástico. O professor enfatizou que esta era apenas uma homenagem ao Lattes. De qualquer modo, os dois comentários nos fizeram cogitar a possibilidade de os estudantes parecerem perceber, ainda que ingenuamente, as complexidades de se fazer Ciência em um país como o Brasil que, de fato, não a valoriza. Essa observação é um tanto quanto desanimadora pois, ainda que saibamos que pesquisadores, cientistas e professores de Ciências tentam reverter esse quadro, esse tipo de percepção relatada pelos estudantes pode desmotivá-los no aprendizado de Ciências. Inclusive, o estudante Enrico chegou a nos procurar em um momento posterior a uma das aulas da sequência para perguntar sobre as dificuldades da carreira científica no Brasil, corroborando nossas observações. Mesmo diante dessas circunstâncias, ressaltamos a importância do estímulo aos alunos para o aprendizado de Ciências, ainda que eles não venham a seguir carreira científica pois, como já fundamentamos no início deste trabalho, a alfabetização científica está diretamente relacionada à inserção desses alunos na sociedade como cidadãos críticos do mundo. Inclusive, somente em uma sociedade cientificamente alfabetizada, que compreende o fazer científico e sua importância também social, seremos capazes de mudar o atual quadro de desvalorização da Ciência.

Já no final da aula, o docente comentou que, apesar da grandiosidade da descoberta, Lattes não foi nem indicado ao prêmio Nobel, enquanto outros colegas do mesmo grupo de pesquisa receberam a premiação. Marie se mostrou inquieta e comentou “*Rutherford não descobriu sozinho mas também é outra história.*”. De fato, o professor reforçou como apenas Rutherford, líder do grupo de pesquisa que contava com seus alunos Geiger e Marsden, recebeu o prêmio Nobel pelos resultados do experimento de Rutherford-Geiger-Marsden, enquanto seus estudantes não foram sequer indicados. Foi bastante interessante notar essa insatisfação final dos alunos quando foi relatado que Lattes não ganhou o prêmio Nobel. Eles já haviam se aborrecido com o fato de que expressões na Física não possuem sobrenomes brasileiros ainda que o aborrecimento não seja totalmente justificável, pois é preciso primeiramente que brasileiros(as) as formulem. Agora, estavam visivelmente mais aborrecidos, o que é perfeitamente justificável, uma vez que, desta vez, um brasileiro participou ativamente na descoberta do pión e, mesmo assim, não obteve o reconhecimento esperado pelo seu trabalho como é dado a cientistas de outras nacionalidades. Neste momento, os alunos conversaram criticamente sobre a hierarquia científica acadêmica e internacional, o que por si só constitui um enorme aprendizado sobre as relações da Ciência no mundo.

A aula teve diversos momentos mais expositivos e, por isso, contabilizamos apenas um total de 70 intervenções, com uma média de 11,7 intervenções por aluno, número parecido com o da primeira aula. Com 10 momentos e 16 sub-momentos foram 7,0 e 4,4 intervenções por momento e sub-momento, respectivamente. Novamente, a média não reflete a realidade dos alunos mais participativos e dos menos participativos. O aluno Werner foi o mais participativo, com 34 intervenções, e participação em 14 dos 31 sub-momentos. A estudante Marie foi a segunda mais participativa, com 18 intervenções e participação em 9 dos 16 sub-momentos. Como relatamos no início da análise dessa aula, o estudante Albert, que não havia participado incisivamente das aulas anteriores, apareceu em terceiro lugar no quesito participação em sala de aula, demonstrando claramente um crescimento em seu interesse pelas aulas e uma maior abertura em sala de aula, com 11 intervenções e participação em 4 sub-momentos. Os outros estudantes (Fabiola, Wolfgang e Chien) participaram pouco da aula, com apenas 1 intervenção cada. Ressaltamos que Fabiola e Wolfgang novamente não participaram da aula completa.

Percebemos uma melhora significativa do investimento no aprendizado por parte dos alunos mais participativos, com destaque para Werner. Também devido a mais momentos expositivos em aula, os indicadores de alfabetização científica mais presentes foram o de organização de informações (**AC-I1B**) e o de classificação de informações (**AC-I1C**), caracterizados pelas operações epistemológicas de classificação (**AC-II5**) e de consistência com outro conhecimento (**AC-II7A**). Eles mostram que os estudantes buscaram mais compreender, organizar e classificar as informações presentes nas discussões em sala de aula do que trabalhar outras ações do fazer científico que, geralmente, aparecem

em momentos mais dinâmicos nas salas de aulas. Com relação às operações de argumento, houve uma maior incidência das garantias (**AC-III3**), em que os níveis de argumentação 0 e 1 foram novamente os mais comuns.

### • Aula 5: Física Nuclear – Parte II

A quinta aula da sequência contou com a presença de cinco estudantes. Os usuais Werner e Albert; Chien, que participou pela primeira vez na aula anterior; e Sonja e César, que não estiveram presentes na terceira e na quarta aulas. Como apenas 3 dos estudantes presentes nessa aula também estiveram presentes na aula anterior, o momento inicial de revisão dessa aula foi bem breve, contando mais com a participação de Werner.

Em seguida, o professor apresentou a grande temática da aula: energia nuclear. De início, já pudemos perceber uma maior tentativa de participação do estudante Albert. Após o professor introduzir a ideia básica do conceito de energia de ligação, quando ele comentou que a energia de um sistema de dois prótons e dois nêutrons separados é maior do que a energia de um núcleo constituído de dois prótons e dois nêutrons, Albert perguntou se essa informação teria relação com a fórmula de Einstein da equivalência massa-energia. O professor imediatamente respondeu que ele estava no caminho certo e motivou o aluno a explicar mais o seu pensamento. Albert foi além e continuou o seu raciocínio, verificando, em primeiro lugar, se o fóton realmente não possui massa. No entanto, acabou por abandonar mas acabou por abandonar a discussão dizendo “*É...deixa pra (sic) lá...*”. O professor novamente buscou motivar que o aluno continuasse sua explicação, mas ele simplesmente não quis continuar. Cabe ressaltar que em nenhum momento o professor ou outro colega interveio na formulação de Albert de maneira tal que o tivesse desmotivado e que não vimos nenhuma razão, além do próprio desconforto com sua exposição em público, para o aluno não continuar sua fala.

Querendo dar continuidade à discussão e ao raciocínio de Albert, a fim de tentar conectar mais esse estudante e ressaltar a importância de sua fala, o professor perguntou se alguém mais teria ideia do porquê a energia do sistema ligado é menor do que a energia do sistema separado. Werner e até o diretor da escola, que esteve presente na primeira metade da aula, fizeram alguns comentários. Depois de alguns minutos, Albert participou novamente, aparentemente mais solto, perguntando como se daria energia para fragmentar o núcleo ligado, sendo este um estado mais natural do sistema. O professor comentou que essa fragmentação é o cerne do processo de fissão nuclear, sobre o qual eles fariam mais tarde na aula, e mencionou que ele é causado pelo bombardeamento do núcleo por determinadas partículas, como fótons ou nêutrons. Albert agradeceu a explicação.

É fundamental perceber e dar atenção ao interesse dos estudantes, tentando sempre conectar aqueles que, por motivos variados, precisam de mais estímulos para participar mais ativamente das aulas. É preciso reformular as perguntas que eles fazem e chamar a

atenção da turma para a importância de discutir as questões que esses alunos propõem. Tais atitudes por parte do professor podem ser fundamentais para que esses estudantes percebam que são considerados e que suas vozes são importantes para o processo de ensino-aprendizagem no ambiente escolar. Percebe-se como a insistência pela participação de Albert, sem qualquer agressividade por parte do professor e/ou dos outros alunos a partir de atos como os citados acima, acabou por, de fato, trazê-lo de maneira mais ativa para a quinta aula da sequência.

O professor então redirecionou a aula para o processo de fusão nuclear. Após um breve momento de explanação sobre o processo, Werner confirmou seu entendimento perguntando se, quanto maior a estabilidade dos núcleos formados pelo processo, menor seriam as energias liberadas. O professor confirmou e mostrou um gráfico com a energia de ligação por núcleon para diversos núcleos, comentando que, quando ela chega no ferro  $\text{Fe}^{56}$ , já não é mais benéfico continuar com os processos de fusão. Para gerar elementos mais pesados do que o ferro, teríamos que dar muito mais energia ao sistema do que a energia que ele liberaria. O professor ainda relacionou o processo de liberação de energia com a energia emitida por explosões de estrelas e a formação de elementos mais pesados no Universo, explicando a famosa frase de (Carl) Sagan de que somos poeiras das estrelas. Os alunos mais participativos nesse momento foram Albert e Werner, por ordem de quantidade de intervenções, ou seja, Albert passou a assumir o posto de aluno mais participativo em diversos momentos da aula.

O professor seguiu perguntando se a turma já tinha ouvido falar de decaimento nuclear e radioatividade, recebendo uma resposta positiva. No entanto, demonstraram não compreender o mecanismo por trás desses processos. Então, o professor fez uma breve explanação em termos do alcance efetivo da força nuclear, mencionando que chega um momento em que o núcleo é muito grande e, como Werner sugeriu, “*Ele não consegue se manter.*”, e decai. O estudante César não tinha comparecido na quarta aula e, portanto não participou da discussão que levou à necessidade da força forte, tendo demonstrado certa dificuldade em acompanhar esse momento. Ele fez algumas perguntas, por exemplo, sobre a influência dos elétrons para a estabilidade do átomo, o que já havia sido abordado na aula anterior. O professor retomou o que haviam discutido naquele momento e o estudante manifestou entendimento. Chamamos a atenção para esse acontecimento a fim de ressaltar a importância em considerar as dificuldades dos alunos, caso contrário, se não sanamos suas dúvidas, torna-se difícil a percepção das relações entre os tópicos discutidos e a elaboração de conexões na estrutura cognitiva dos alunos. No entanto, cabe ressaltar que lidamos com poucos estudantes em sala de aula, o que permitiu dar uma maior atenção às dificuldades de César. Entendemos que é um processo muito mais complexo, e ainda sem resposta definitiva, dar atenção às dificuldades quando as salas de aula são compostas por um número elevado de estudantes.

Após esse momento de atenção maior às dificuldades de César, o professor retomou

o decaimento nuclear quando o núcleo se torna cada vez maior. Albert perguntou se, quanto mais carga o núcleo tiver, mais radioativo ele é. O professor sistematizou dizendo que, a partir do ferro  $\text{Fe}^{56}$ , quanto maior o núcleo e mais desbalanceado for o número de prótons em comparação ao de nêutrons, mais radioativo ele é.

Nesse momento, o professor aproveitou para abordar cada um dos três tipos de decaimento nuclear: alfa, beta e gama. Ele mencionou que o primeiro deles seria simplesmente emitir uma parte do núcleo para fora, ao que o estudante César levantou a hipótese de que seria sempre uma partícula alfa, um núcleo de hélio  $\text{He}^4$ , a ser emitida. Albert aproveitou para perguntar porque não poderia ser um outro núcleo maior do que o hélio e o professor explicou sobre a importância da estabilidade do núcleo comparativamente ao seu tamanho, o que acabou por sanar a dúvida de Albert e também confirmar a hipótese de César.

O professor então introduziu o segundo tipo de decaimento, o beta, relatando sua ocorrência quando um nêutron se transforma em um próton ou um próton se transforma em um nêutron. César complementou “*Libera um elétron.*”, e o professor sistematizou que é um elétron liberado no decaimento  $\beta^-$ , mas um pósitron no decaimento  $\beta^+$ . O professor perguntou o porquê dessa diferença e os estudantes sugeriram que dependeria de qual transformação era considerada para satisfazer a conservação de carga elétrica, mencionada pelos estudantes através do termo “igualdade de carga”.

Para motivar o último tipo de decaimento, o gama, o professor usou o exemplo do personagem de histórias em quadrinhos *Hulk*, que supostamente ficou verde por ter recebido radiação gama, ou seja, radiação em forma de fótons. Ele explicou que, nesse tipo de decaimento, ocorre o processo inverso de emissão de fótons quando um núcleo instável de maior energia decai para um outro núcleo com menor energia.

Finalizada a discussão ampla sobre o processo de fusão, o professor direciona a aula para a apresentação e a discussão do processo de fissão nuclear. Para isso, ele retomou a tabela de energia de ligação e mostrou como, a partir do núcleo de ferro  $\text{Fe}^{56}$ , não se tem mais ganho de energia, e o processo inverso passa a ser mais favorável energeticamente. Então, à medida que os núcleos maiores se tornam núcleos menores, eles liberam energia. César perguntou se seria por isso que a tendência do urânio é chegar no ferro, ao que o docente concordou, mas completou dizendo que a cadeia do urânio acaba não chegando no ferro. Albert perguntou o que seria o termo “núcleons” na tabela que o professor já havia mostrado desde a discussão sobre o processo de fusão, ao que o docente respondeu que seria um termo genérico para prótons e nêutrons, e Albert aproveitou para validar a afirmação de que o termo então se referia a tudo o que pertence ao núcleo.

O professor então foi mais a fundo na descrição do processo de fissão, relatando que ocorre uma quebra do núcleo e usou o exemplo da cadeia do urânio  $\text{U}^{235}$ , com figuras ilustrativas desse núcleo instável sendo bombardeado por um nêutron, o que acaba por

formar um núcleo ainda mais instável, o urânio  $U^{236}$ . Este novo núcleo decai em outros núcleos, com a liberação de três nêutrons. Ou seja, o processo se inicia com um nêutron e libera três, o que gera uma reação em cadeia. Quando o professor perguntou o que acontece com essa liberação de energia, o estudante Werner respondeu “*Hiroshima*.”. Sonja, Albert e Chien verificaram se os núcleos formados poderiam variar e, quando Albert demonstrou confusão trazendo os decaimentos alfa, beta e gama como se estivessem relacionados ao processo de fissão, Sonja interveio com autonomia dizendo que decaimentos são naturais, enquanto a fissão é um processo induzido. O professor aproveitou para complementar a fala de Sonja, dizendo que existe também fissão natural e que o que seria importante para distinguir os dois processos é que, enquanto na fusão dois núcleos se unem, na fissão o núcleo é quebrado.

Demonstrando investimento no aprendizado e autonomia, o estudante Werner perguntou se a Curie faleceu devido à energia liberada nesses processos, e o professor concordou, dizendo que justamente por conta da radiação liberada ser altamente energética e ionizante. Werner aproveitou para confirmar se o conceito de ionizante seria o de retirar elétrons, ao que o professor respondeu positivamente, explicando o que acontece em nosso DNA quando recebemos altas doses de radioatividade.

Em seguida, o professor trouxe o exemplo da série de televisão *Chernobyl*, perguntando se os alunos já a tinham assistido, a fim de iniciar uma discussão sobre os acontecimentos relacionados a esse acidente. Todos os estudantes participaram intensamente desse momento, relatando o que já tinham assistido da série, formulando diversas perguntas sobre os acontecimentos nela mostrados, e trazendo ainda novas informações sobre o acidente. Eles perguntaram sobre a nuvem tóxica formada que quase se espalhou por toda a Europa. Perguntaram também sobre como se forma o câncer e sobre como até mesmo máquinas ficam destruídas com a radiação ionizante. Foi um momento de bastante descontração, mas que não ficou somente na surpresa com as informações. Pelo contrário, elas foram discutidas sistematicamente pelo professor para se aproximar o mais possível de um real aprendizado dos conceitos envolvidos e não permanecer apenas na falsa percepção de aprendizado pelo fantástico, de acordo com o já citado texto de Bachelard na análise da segunda aula [BACHELARD, 2005]. Com relação a informações trazidas pelos próprios estudantes, podemos citar o momento em que Werner trouxe a informação da distância que turistas atualmente devem adotar com relação à usina na região de Chernobyl e também por quanto tempo podem permanecer nessa região. Para complementar a discussão, o docente aproveitou para comentar sobre níveis aceitáveis de radiação aos quais podemos nos expor, traçando um paralelo com os exames de raios-X e a curiosidade de que até mesmo uma banana é radioativa.

A aula prosseguiu na temática da radioatividade e seus perigos, com o professor mostrando imagens das cidades de Hiroshima e Nagasaki antes e depois da liberação das bombas nucleares, para espanto total dos alunos. Eles sabiam que houve destruição,

mas não imaginavam sua real dimensão. Sonja perguntou sobre o porquê da formação de um cogumelo durante a explosão, ao que Albert, de forma autônoma e com o uso de estratégias, se manifestou explicando sobre a formação de ondas de convecção de calor. Foi interessante notar como Albert se sentiu bastante confortável em sua manifestação e, a partir de sua participação mais enfática durante essa aula e, principalmente, a partir deste momento da aula, percebemos que ele deixara para trás a não expressividade e a baixa interação das aulas anteriores. Veremos, inclusive, como ele se tornará um dos principais participantes das próximas aulas.

Os momentos de discussão sobre a temática da radioatividade foram os de maior participação da turma na aula. Werner perguntou se teria alguma diferença caso as bombas explodissem no chão, ao que Chien comentou que certamente o solo seria mais fatalmente contaminado. O professor aproveitou para comentar como a explosão das bombas no ar deve ter sido pensada de antemão, pois dessa forma há uma continuidade da explosão na direção do solo, otimizando a destruição.

Em seguida, César se interessou pelo controle do lançamento das bombas. O professor relatou que há uma ativação remota para que o primeiro nêutron bombardeie o núcleo instável, o que gera a reação em cadeia já discutida anteriormente.

O professor aproveitou para mostrar uma outra série de imagens nas quais, após as nuvens das explosões passarem queimando tudo, só sobraram marcas das sombras de pessoas que foram desintegradas. Os alunos ficaram surpresos, perguntando se elas estavam lá até hoje e buscaram compreender em detalhes a formação dessas sombras. O professor sistematizou dizendo que foram formadas justamente nas regiões de asfalto e outras estruturas que foram protegidas pelas próprias pessoas queimadas quando a explosão as atingiu.

Em seguida, o professor comentou sobre como as usinas nucleares possuem mecanismos de controle para prevenir que esses acidentes aconteçam, ao que Werner perguntou sobre o que aconteceu em Fukushima, relacionando como, apesar desses mecanismos, outros fatores também poderiam influenciar na ocorrência de desastres nucleares. O professor comentou que ocorreram uma série de desastres naturais, um terremoto seguido de um tsunami, causando um descontrole da usina e o derretimento do sistema que mantém o núcleo no estado sólido. Nessa direção, César mencionou com autonomia sobre os sistemas de absorção de nêutrons pelo grafite e pelo boro que ajudam a amenizar problemas no caso do derretimento.

Após abordar com extensão as desvantagens da energia nuclear, a aula foi direcionada para uma discussão sobre suas vantagens e questões políticas que envolvem o seu uso e o enriquecimento do urânio. Foi abordado como as emissões de gases do efeito estufa, que aceleram o aquecimento global, são baixíssimas no caso da energia nuclear. Outra vantagem é que há muito menos impacto ambiental em termos de área que deve

ser empregada para a construção de uma usina nuclear, quando comparada, por exemplo, à região utilizada para construir usinas hidrelétricas. O estudante Albert trouxe várias informações para essa discussão, como o fato de que há um desmatamento considerável na região próxima aos rios e a necessidade de retirar residentes da região para poder criar os reservatórios e as barragens no caso da energia a partir de hidrelétricas. O professor mencionou que ainda há o risco de rompimento dessas barragens.

Os alunos puderam perceber a complexidade envolvida em uma discussão que considerou diversas informações sobre o uso de energia nuclear, refletindo para além do básico com o qual estamos habituados no dia a dia. Os alunos iniciaram a discussão apenas trazendo as desvantagens da energia nuclear, mas aos poucos, entre interações promovidas por eles mesmos a partir de informações dos colegas e do professor, os alunos chegaram ao fim da discussão sem uma posição bem definida sobre a questão do uso da energia nuclear. A percepção final foi de que há diversas vantagens e pouca chance de ocorrer um acidente mas, caso ele ocorra, certamente será um acidente bastante ruim. Então, concluíram que, algo a se considerar antes de qualquer outra coisa seria então, no mínimo, mais investimentos em mecanismos de segurança para as usinas nucleares.

Ainda na direção de promover debates sobre a ética e a moral na Ciência, houve uma discussão sobre o enriquecimento de urânio, capaz de retirar o útil  $U^{235}$  do mais abundante isótopo  $U^{238}$ , tópico que gera diversas tensões políticas mundiais. Discutiu-se sobre a convenção internacional que estabelece os limites legais de enriquecimento que os países devem adotar. Caso contrário, os países signatários podem suspeitar do uso do enriquecimento para intenções nefastas, como a explosão de bombas ao invés de seu uso apenas para geração de energia.

No penúltimo momento da aula, os alunos se envolveram em uma conversa sobre o destino dado ao lixo radioativo. Alguns estudantes ficaram surpresos quando o professor mencionou que alguns países levam o lixo radioativo para o espaço e que são utilizados em submarinos nucleares, inclusive no Brasil. Werner ainda acrescentou que o plutônio serviu de combustível na missão *Horizon*, que foi a Plutão, e também para geração de energia a ser usada na comunicação do aparato dessa missão com a Terra quando ele já se encontrava distante de sua principal fonte de energia, a solar.

Para finalizar a aula, o professor comentou que, atualmente, muitos trabalham no desenvolvimento da energia nuclear também a partir do processo de fusão, mencionando que para fazer uma bomba a partir dele o pessoal foi bem rápido, mas que para gerar energia ainda há certa dificuldade. Essa fala provocou os alunos. Werner perguntou se essa seria a bomba de hidrogênio, o que foi confirmado pelo docente. Ele explicou que, para produzi-la, seria necessário fundir dois núcleos, ou seja, uma quantidade enorme de energia. Dessa forma, seus desenvolvedores utilizam a explosão de uma bomba de fissão para gerar a energia suficiente para, em seguida, produzir uma bomba de fusão, de hidrogênio. Os estudantes

ficaram estupefatos e perguntaram “*Então são duas explosões?*”. Dessa forma, como foi enfatizado pelo docente, acaba que a demanda de energia inicial para produzir energia no processo de fusão é maior do que a própria energia alcançada pelo processo de fusão, o que não vale à pena. O professor comentou que atualmente os pesquisadores trabalham na fusão a frio, sem a necessidade dessa energia imensa inicial. Werner, brilhantemente, constatou “*Construir é mais difícil.*”. Além disso, quando o professor mencionou que certamente os descobridores da fusão a frio ganharão o prêmio Nobel, por ser um método capaz de fornecer facilmente uma energia absurda, Werner concluiu com brilhantismo “*Quanta coisa que é pra (sic) ser importante pra (sic) humanidade acaba destruindo a humanidade.*”.

O professor finalizou a aula tentando amenizar a situação. Para isso, ele mencionou que quem descobrir a fusão a frio pelo menos não ficará com peso na consciência, pois não verá o perigo de ter sua descoberta utilizada para gerar uma bomba potente, uma vez que esta já foi criada. O contrário aconteceu com o projeto *Manhattan*, que contou com a participação de diversos cientistas que sabiam apenas que seus trabalhos no projeto poderiam dar fim à Segunda Guerra Mundial. No entanto, coagidos com a esperança do fim de uma guerra, acabaram produzindo as primeiras bombas nucleares, que foram utilizadas em civis. A confiança exacerbada de que suas descobertas científicas não seriam usadas para outros propósitos, o que acabou ocorrendo, deve deixar um alerta aos cientistas. Eles não devem deixar de lado discussões éticas e morais do fazer científico. Caso contrário, podem ser coagidos politicamente e usados como meros fantoches.

Quando refletimos sobre a perspectiva de Paulo Freire da educação para formar cidadãos críticos no mundo, percebemos como essa aula conseguiu contemplá-la muito bem. A alfabetização científica dos estudantes propõe justamente a promoção de relações entre Ciência, Sociedade, Tecnologia e Meio-Ambiente (CTSA), que perpassa os pressupostos freireanos. A discussão de fatores éticos, políticos, tecnológicos e ambientais esteve presente durante toda a aula, em um ambiente estimulante para que os alunos pudessem observar, refletir, cooperar, comunicar, discriminar valores e julgar. Enfim, entender as complexidades do mundo que lhes cerca, provocando-os a continuarem refletindo sobre essas complexidades ao longo de suas vidas a fim de que saibam agir sobre o mundo de maneira autônoma. Esta foi a aula da sequência em que se propôs inserir esses elementos ao máximo e pensamos que alcançamos esse objetivo. É interessante perceber que foi uma das aulas com o maior número de intervenções por parte dos alunos e também foi a aula da mudança de postura em sala de aula do aluno Albert. Acreditamos que essas duas observações estão diretamente relacionadas a esse aspecto da aula ser mais abrangente com relação a questões do mundo que cerca os estudantes e, por isso, ter também promovido um maior engajamento.

Percebemos uma ótima participação dos alunos nessa aula, bem como uma incidência de mais indicadores de alfabetização científica. Contabilizamos um total de 141 intervenções, com uma média de 28,2 intervenções por aluno, a maior média de intervenções

em uma aula até o momento da sequência. Em 16 momentos e 28 sub-momentos obtemos 8,8 e 5,0 intervenções, respectivamente. Novamente, a média não reflete a realidade dos alunos que mais participaram e que menos participaram, os casos de Albert e Chien, respectivamente. Albert participou com 53 intervenções em 19 dos 28 sub-momentos. Já Chien participou apenas com 5 intervenções em 5 dos sub-momentos.

Como já comentamos, nessa aula tivemos um enorme salto na participação do aluno Albert, que até a presente aula havia se manifestado poucas vezes, em situações pontuais. Ele foi o aluno mais participativo da aula, superando até mesmo Werner que tinha sido o mais participativo em todas as outras aulas. No entanto, este ainda continuou com uma excelente participação, sendo o segundo estudante mais participativo, com 41 intervenções e participação em 18 dos 28 sub-momentos. Os outros estudantes participaram bem da aula. César e Sonja contabilizaram 30 e 12 intervenções cada, em 14 e 7 sub-momentos, respectivamente.

Foram vários os indicadores de alfabetização científica mais presentes: seriação de informações (**AC-I1A**), organização de informações (**AC-I1B**), classificação de informações (**AC-I1C**), raciocínio lógico (**AC-I2A**) e justificativa (**AC-I3C**), caracterizados também por múltiplas operações epistemológicas. As mais frequentes foram a indução (**AC-II1**), causalidade (**AC-II3**), apelo à autoridade (**AC-II6D**), consistência com outro conhecimento (**AC-II7A**), e plausibilidade (**AC-II8**). Percebemos uma maior parcela de incidência nos indicadores de justificativa, pois os estudantes em todos os momentos da aula incorporavam ideias às discussões, várias delas confirmando aspectos abordados. A caracterização dessas justificativas se dava, por sua vez, principalmente, com apelo à autoridade ou consistência com outro conhecimento, mas principalmente por uma correlação entre ambos, uma vez que os conhecimentos apresentados pelos alunos partiram de fontes diversas, como livros, falas de outros professores ou cientistas em revistas, jornais e documentários.

Com relação às operações de argumento, dados (**AC-III1**) e garantias (**AC-III3**) foram os mais presentes na argumentação dos estudantes, com níveis 0, 1 e 2 os mais recorrentes.

### 3.1.3 Aulas 6 e 7: A interação forte (QCD)

#### • Aula 6: A seção de choque e subestruturas nos prótons e nêutrons

Na sexta aula da sequência, seis estudantes estiveram presentes, com cinco deles tendo participado de aulas anteriores. A sexta estudante, Lise, que compareceu pela primeira vez, chegou na sala junto a Werner, ou seja, já é o terceiro estudante que participou das aulas por influência direta de Werner. Novamente o primeiro momento da aula foi de breve revisão da aula anterior, em que apenas Peter e Lise não se manifestaram diretamente para a turma. Os estudantes comentaram que a última aula foi relacionada à

energia nuclear e relembrou as discussões sobre energia de ligação, fissão e fusão nuclear, e decaimentos. Comentaram que nos decaimentos dos prótons e dos nêutrons devem ser emitidos um antielétron e um elétron, respectivamente, por conservação de carga elétrica. Além disso, comentaram sobre as bombas de Hiroshima e Nagasaki, e também sobre como uma usina nuclear funciona.

No momento seguinte, os experimentos de Thomson e de Rutherford-Geiger-Marsden foram lembrados. Werner demonstrou certa confusão ao identificar as partículas alfa do segundo experimento com fótons, corretamente corrigido por Marie que identificou a partícula alfa com um núcleo de hélio. Pensamos que a confusão de Werner ocorreu talvez devido à mistura entre os nomes alfa e gama nas identificações dos decaimentos alfa, beta e gama, abordados na aula anterior. O professor sistematizou os fótons como os raios gama. Quando o professor abordou a intensidade da interação das partículas alfa com os átomos da folha de ouro, Werner sugeriu que ela estivesse ligada ao grau de desvio das partículas alfa incidentes na folha. O professor concordou, mas complementou a discussão dizendo que somente o número de partículas incidentes não indicaria muita coisa pois, caso mais partículas interagissem com a folha de ouro, mais certamente seriam desviadas. Ele enfatizou que o mais importante é a proporção entre o número total de partículas incidentes e seu fluxo, ideia com a qual os estudantes concordaram.

Dessa forma, o professor entrou na discussão dos detalhes sobre a seção de choque, grandeza muito utilizada na Física de Partículas para avaliar a interação entre duas ou mais partículas. Os estudantes formularam a expressão conceitual para essa grandeza de acordo com o átomo de Rutherford. Em particular, eles discutiram sobre a seção de choque entre as partículas alfa e as partículas do átomo de ouro, chegando em sua proporcionalidade com o número de partículas alfa desviadas e a proporcionalidade inversa com o fluxo incidente, bem como com o número de átomos de ouro na folha. Cabe ressaltar que Marie deixou a sala neste momento, com aproximadamente 30 minutos de aula.

Em seguida, o professor mostrou a curva esperada da seção de choque entre as partículas alfa e as partículas do átomo de ouro considerando o átomo como o de Thomson e a curva obtida no experimento de Rutherford-Geiger-Marsden. A discrepância instigou Rutherford a propor uma nova configuração para o átomo. O professor comentou que Rutherford considerou o átomo composto por um núcleo, este formado por prótons e nêutrons, muito menor do que o tamanho do átomo de Thomson, e com os elétrons orbitando esse núcleo. Ou seja, a aproximação de Rutherford foi a de um núcleo pontual. Essas mudanças já demonstravam concordância com a curva obtida experimentalmente. Werner disse não compreender como o átomo de Thomson desvia menos as partículas alfa incidentes do que o átomo de Rutherford, de mesmo raio que o de Thomson mas, simplesmente com um núcleo menor. Ele pensou ser o contrário, ou seja, quanto menor o núcleo, menos seria o desvio. O professor, em conjunto com os próprios alunos, trabalhou com a conservação de energia entre os instantes inicial, em que a partícula alfa possui

apenas energia cinética em direção à folha de ouro, e o final, em que ela possui energia cinética e também potencial devido à interação com o átomo de ouro. Dessa forma, a turma chegou em uma expressão que pôde ser analisada com alguns casos limites, convencendo os estudantes de que, com um núcleo muito pequeno, mais partículas incidentes desviariam o que, à primeira vista, é de fato contra-intuitivo.

Cabe ressaltar que, durante os primeiros momentos da aula, o professor-coordenador na escola tentou habilitar o retroprojetor da escola e ele acabou não funcionando. No final do segundo momento, os estudantes se aproximaram mais e o professor passou a utilizar a tela do próprio laptop para mostrar os slides, figuras, tabelas e gráficos, necessários para as discussões da presente aula. Os estudantes apoiaram o professor na nova organização da sala, com Werner comentando “*Programa ao vivo é sempre assim.*” e, quando o professor-coordenador na escola disse que nem sempre a tecnologia nos ajuda, Marie se manifestou em concordância.

Dessa forma, no momento seguinte, o professor abordou como ir além do átomo de Rutherford. Ele explicou que Rutherford não havia variado a energia da partícula alfa incidente. A curva da seção de choque esperada para partículas alfa com energias mais altas a um ângulo de desvio fixo, caso o átomo de Rutherford estivesse correto, foi mostrada. Em seguida, apresentou-se a mesma curva só que obtida pelo experimento. A discrepância entre a curva esperada da teoria supondo o átomo de Rutherford e a curva obtida pelo experimento foi notada de imediato pelos estudantes. A curva experimental estava muito abaixo da esperada. Os alunos formularam algumas explicações para essa observação. Por fim, eles concordaram com Werner, que suspeitou que alguma outra coisa estivesse absorvendo energia do sistema, demonstrando que o núcleo deveria ser formado por outras partículas com as quais as partículas alfa incidentes estariam interagindo, o que não foi levado em conta por Rutherford.

O professor aproveitou para abordar uma das vertentes do fazer científico: o progresso na Ciência através de observações em desacordo com o esperado pela teoria. Dessa forma, cientistas são forçados a pensar em novas perspectivas e ideias para explicar determinado fenômeno e, assim, comparar as novas previsões com as observações realizadas. Se concordam com as observações, as pesquisas rumam para novas direções. Se, novamente, não concordarem com as observações, os cientistas devem repensar suas hipóteses. Fomentar essas discussões e atividades se relaciona diretamente ao fazer científico, dimensão que tem vínculo direto com um dos eixos da alfabetização científica: o da compreensão da natureza da ciência e dos fatores que influenciam sua prática. Como comenta [SASSERON \[2015\]](#), essa dimensão acaba

(...) deflagrando a importância de que o fazer científico também ocupa espaço nas aulas de mais variados modos, desde as próprias estratégias didáticas adotadas, privilegiando a investigação em aula, passando pela apresentação e pela discussão de episódios da história das ciências que

ilustrem as diferentes influências presentes no momento de proposição de um novo conhecimento; (...) (SASSERON [2015], p. 57)

Seguindo com a aula, o professor explicou como partículas altamente energéticas conseguem enxergar escalas menores. Para isso, ele retomou a dualidade onda-partícula e o funcionamento da visão, através da incidência de fótons em um objeto e o reflexo deles até os nossos olhos. O professor então altera o comprimento de onda da luz incidente e pergunta se os alunos seriam capazes de enxergar alguns objetos propostos, utilizando a relação de Planck-Einstein entre energia e comprimento de onda. O docente aproveitou para abordar como isso mostra que precisamos de aceleradores de partículas que atingem energias altas e, dessa forma, consigam enxergar estruturas cada vez menores na Natureza.

Os últimos momentos da aula foram destinados a duas atividades. Esses foram os momentos de maior número de participações pelos alunos. Enquanto a primeira das atividades envolveu uma brincadeira com a simulação de uma questão do ENEM, a segunda lidou com uma questão real da FUVEST.

Na primeira atividade, o professor iniciou comentando com os alunos que a seção de choque para partículas alfa a altas energias poderia ser obtida da seção de choque para partículas pontuais multiplicada por uma função  $f$ . A primeira tarefa dos alunos era explicar porque  $f$  deveria ser menor do que 1. Albert se manifestou porém, para o professor e os colegas, sua fala foi inaudível, ao que o professor pediu que repetisse. Ele se recusou e os colegas o motivaram a falar novamente. Emmy disse “*Pode falar com convicção.*”, enquanto Peter falou “*Consciente.*”. Albert se virou para o professor e falou “*Você pode explicar.*”, ao que o professor respondeu “*Ah, mas se eu explicar fica sem graça.*”. Emmy tentou ajudar o professor quando se direcionou para Albert e disse “*Eu quero entender o que você falou.*”, sustentado por outros alunos, como Werner e Peter, que complementaram “*Exatamente.*” e “*É o seguinte...negócio de honra.*”. Albert então tomou coragem e se manifestou “*O negócio é abaixo da forma, então é menor que a interação. Se fosse maior do que 1, o gráfico ia subir, e não diminuir.*”. Houve clareza na argumentação, com a presença de dados, garantias e qualificadores, caracterizando um nível 3 de argumentação, o único da aula. Professor e alunos concordaram.

Em seguida, o professor projetou gráficos para a função  $f$  e pediu que os alunos levantassem hipóteses sobre qual delas seria a hipótese correta. Eles discutiram, apresentando argumentos tanto para refutar algumas possibilidades como para sustentar outras. Os primeiros a explicarem suas escolhas foram Werner e Peter. Emmy demonstrou certa dúvida e questionou o que refutaria uma das alternativas apresentadas que não foi mencionada como possivelmente correta por Werner ou Peter. Albert com autonomia deu uma primeira explicação, seguida de considerações de Peter e Werner. Por fim, Emmy sentiu-se satisfeita, bem como os demais estudantes que, após todas as ponderações, optaram pela alternativa que, de fato, era a correta.

Registramos um total de 33 intervenções nessa atividade. Werner, Albert, Peter e Emmy participaram com 8, 7, 6 e 12 intervenções, respectivamente.

Na segunda atividade, o professor utilizou uma questão de Química da FUVEST, não relacionada a qualquer tópico da Física de Partículas, para enfatizar como a leitura de resultados em forma de gráficos por si só já pode fornecer uma enorme contribuição para a formulação de novas teorias, tal como ocorreu no caso da análise de gráficos das mais diversas situações para a seção de choque das partículas alfa com as do átomo de ouro. Dessa forma, o docente pôde enfatizar a importância da linguagem gráfica no dia a dia do fazer científico.

De acordo com VYGOTSKY [1984], a mediação das interações entre os indivíduos e o mundo físico ocorre através de ferramentas ou artefatos culturais, sendo a linguagem um dos elementos mais importantes. A utilização desses artefatos transforma o próprio funcionamento da mente. Levar os alunos da linguagem do cotidiano para a linguagem científica significa transformar as palavras do cotidiano dos alunos em significados científicos, com papel fundamental para a elaboração de conceitos [CARVALHO, 2017]. A linguagem científica contempla diversas outras linguagens, além da oral e escrita. Portanto, é fundamental que figuras, tabelas, gráficos e a linguagem matemática sejam introduzidos aos estudantes, para que eles se familiarizem com outros modos de comunicação nas Ciências que podem ampliar e favorecer a construção de seu conhecimento. Aqui, e em diversos outros momentos da sequência, percebemos a consideração em aproximar os estudantes dessas outras linguagens do fazer científico.

Foi interessante notar como os alunos se encontravam extremamente engajados nesse momento. Eles se surpreenderam com o professor quando ele comentou que poderiam “chutar” uma alternativa, mas que precisariam ter uma justificativa para ela. Emmy comentou que assim não seria um “chute”, o que foi refutado por Albert que disse “*Tem como chutar educadamente.*”. O professor explicou que eles não precisavam saber a fundo conteúdos complexos sobre cadeias de carbono, temperaturas de ebulição e outros tópicos relacionados à questão proposta, mas que poderiam refletir sobre as informações apresentadas no enunciado da questão, elaborar hipóteses, testá-las, fazer previsões, e assim chegarem em alguma justificativa para a escolha de uma determinada alternativa.

Os estudantes assim fizeram, com bastante autonomia, investimento no aprendizado e uso de estratégias. Inclusive, o aluno Albert formulou uma argumentação extremamente elaborada para justificar sua escolha, com o uso de conclusão, garantias, apoios, qualificadores e refutadores, atingindo a única argumentação da aula no nível 4, máximo de hierarquia argumentativa de acordo com os critérios apresentados na metodologia deste trabalho.

O professor chamou a atenção para o fato de que é exatamente assim que se faz Ciência. Pediu que eles se colocassem no lugar de um(a) cientista que estivesse estudando

as propriedades envolvidas na questão pela primeira vez, destacando como ele(a) não teria um enunciado em sua frente dizendo o que fazer, o que procurar, mas que ele(a) deveria ter a autonomia para elaborar uma hipótese que pudesse resolver algum problema aberto em uma determinada área científica, fazendo uma analogia com o “chute” e que pudesse ser testada. Caso essa hipótese se confirmasse, a Ciência teria conseguido um avanço, o(a) cientista teria feito uma descoberta. Caso ela não se confirmasse ou o resultado das observações fosse inconclusivo, o(a) cientista deveria reformular sua hipótese ou buscar outro meio de testá-la. Após esse comentário do professor, o estudante Werner fez a seguinte observação *“Não é fácil. (...) Se você não sabe, você sabe algumas peças.”*. Por fim, o docente destacou como o trabalho de pesquisa científica tem se tornado cada vez mais colaborativo.

Durante a segunda atividade ocorreram 52 intervenções. Werner, Albert, Peter, Emmy e Lise participaram com 8, 10, 15, 17 e 2 intervenções, respectivamente. A quinta aula já tinha demonstrado um salto na participação dos alunos e a sexta aula repetiu esse feito. A participação foi ainda um pouco maior do que a da quinta aula. No total observamos 181 intervenções. Com seis alunos presentes na aula, isso nos fornece uma média de 30,2 intervenções por aluno. Novamente, a média não reflete a realidade para os alunos que mais participaram e que menos participaram, os casos de Werner e Lise, respectivamente. Werner participou com 70 intervenções em 17 dos 20 sub-momentos. Já Lise participou apenas com 3 intervenções em 1 dos sub-momentos. Nessa aula, a segunda maior taxa de participação veio de Emmy, com 45 intervenções em 13 dos sub-momentos. Também com muitas intervenções aparecem Albert e Peter, com 26 intervenções em 9 sub-momentos e 25 intervenções também em 9 sub-momentos, respectivamente. Já Marie participou em 12 oportunidades distribuídas em 6 sub-momentos. Cabe ressaltar que Marie deixou a sala com, aproximadamente, 30 minutos de aula. No geral, Marie vinha demonstrando uma boa participação nas aulas e, realmente, a queda no número de intervenções se deu por conta de ela ter não ter permanecido em sala até o final da aula. As médias de intervenções para os 11 momentos e 20 sub-momentos foram 16,5 e 9,1, respectivamente.

Ressaltamos aqui como, apesar de problemas no retroprojeto e a necessidade de os alunos visualizarem as figuras, tabelas e gráficos relevantes para a aula e as atividades na tela do laptop do professor, isso não pareceu ter comprometido o entusiasmo dos alunos e a qualidade da aula. Como eram poucos alunos, apenas seis, eles conseguiram se organizar bem para acompanhar as ferramentas visuais, quando foram utilizadas e, além disso, a sexta aula foi a terceira colocada da sequência em termos de participação dos alunos. Ainda veremos as primeiras e segundas colocadas. Chamamos a atenção para a provável incapacidade de obter esses mesmos resultados em uma turma maior, uma vez que eles não conseguiriam se aproximar do laptop e efetivamente enxergar as imagens utilizadas e tampouco o professor conseguiria reproduzi-las no quadro no tempo viável de uma aula

regular.

Com relação aos indicadores de alfabetização científica, os mais frequentes foram: organização de informações (**AC-I1B**), raciocínio lógico (**AC-I2A**), levantamento de hipóteses (**AC-I3A**) e explicação (**AC-I3E**). Já as operações epistemológicas mais recorrentes foram: causalidade (**AC-II3**), definição (**AC-II4**), apelo ao atributo (**AC-II6C**) e consistência com experiência (**AC-II7B**). O primeiro deles teve alta incidência por conta do momento de revisão da aula anterior. Já os outros três indicadores tiveram alta incidência justamente durante as duas atividades nos momentos finais da aula. As três operações mais frequentes também ocorreram caracterizando as ações do fazer científico durante as atividades da aula. Já a consistência com experiência ocorreu mais durante a discussão sobre a relação de Planck-Einstein, quando o professor estimulou a vivência dos alunos para pensarem sobre como observar objetos pequenos exige altas energias.

Com relação às operações de argumento, percebemos uma maior incidência de dados (**AC-III1**), garantias (**AC-III3**) e apoios (**AC-III4**), mas houve também incidências de conclusão (**AC-III2**) e qualificadores (**AC-III5**). Os níveis mais comuns de argumentação foram 0 e 1, mas houve duas incidências do nível 2, por Werner e Emmy, e uma incidência do nível 3 e do 4, ambas por Albert, sendo que a última foi mencionada em seu contexto na análise detalhada acima dos momentos da aula.

### • Aula 7: Os quarks e suas cores

Na sétima aula da sequência, e última do terceiro bloco cuja temática foi a interação forte e a Cromodinâmica Quântica, compareceram cinco alunos: Werner, Albert, Peter e Emmy, que estiveram presentes na sexta aula, e Enrico, cuja última participação se deu na terceira aula da sequência. Logo no início da aula Werner e Enrico nos surpreenderam ao demonstrar grande interesse pela carreira de Física. Eles perguntaram ao professor como era ser Físico, e este aproveitou para comentar sobre as diversas possibilidades e perspectivas dentro da carreira. Em seguida, Enrico perguntou sobre aceleradores e colisores de partículas. O professor comentou sobre as particularidades de cada um, citando até mesmo o acelerador Sirius, em Campinas (São Paulo), para aproximar mais os alunos à temática e chamar a atenção deles para a existência desse campo de pesquisa dentro do próprio país. Ele comentou também sobre o Grande Colisor de Hádrons, o LHC, na Suíça.

Uma breve revisão da aula anterior se deu logo em seguida, com o professor inicialmente retomando alguns conceitos principais, relembrando toda a cronologia da divisão do átomo e questionando se ela pararia nos prótons e nos nêutrons ou se os estudantes pensavam que teria algo mais. Ele conectou essa pergunta com as análises gráficas da última aula, em que a seção de choque para partículas alfa a altas energias colidindo com átomos da folha de ouro desviou consideravelmente da curva esperada levando em consideração o átomo de Rutherford. Werner lembrou que, a partir dessa

análise, podemos concluir que o núcleo é formado por partículas ainda menores do que os prótons e os nêutrons.

O professor apresentou como experimentos em que elétrons colidem com prótons ou nêutrons foram realizados para enxergar as subestruturas dentro dos próprios componentes do núcleo atômico. Para isso, ele partiu de uma analogia desses experimentos com o de Rutherford-Geiger-Marsden, que foi além do átomo de Thomson e detectou as subestruturas do núcleo. Ele lembrou como Rutherford chegou na ordem de grandeza  $10^{-15}$  m para o raio do próton, ao que Peter reagiu “*É muito zero né?*”.

O uso de analogias a partir de situações já exploradas e conhecidas dos estudantes facilita o processo de ensino-aprendizagem, pois ao se comparar situações e ponderar sobre semelhanças e diferenças com construtos já existentes na estrutura cognitiva dos alunos, eles elaboram significados e modos de pensar sobre os novos conhecimentos de forma relacional. Ainda que trabalhando com temáticas totalmente distintas, uma simples forma de pensar sobre uma delas pode nos auxiliar a refletir também sobre a outra. Amplia-se a percepção de que formas de pensar sobre situações diferentes podem ser similares e, dessa forma, os conhecimentos são apresentados como integrados, e não separados em blocos de conteúdos desconexos.

A partir da curiosidade dos próprios estudantes pelo tamanho do raio do próton, o docente aproveitou para discutir a importância de se ter noções sobre ordens de grandeza na Física e nas Ciências em geral. Inicialmente, ele questionou se os alunos espantavam-se com essa medida para o raio do próton. Albert disse que ela não o chocava, mas quando o professor perguntou se eles achariam estranho que um núcleo atômico tivesse  $10^{-2}$  m, os estudantes riram e se manifestaram “*Caraca...enorme...*” e “*Tá errado!*”. Essa reação imediata com estranheza é compreendida quando o professor confirmou com os estudantes a ordem de magnitude do tamanho de um átomo, de  $10^{-10}$  m, já abordada em aulas anteriores da sequência. Por isso, pensamos que eles puderam discernir quase que de imediato que a ordem de magnitude do núcleo atômico deveria ser menor do que a do próprio átomo.

O professor aproveitou então para enfatizar como a consideração de ordens de grandeza ajuda muito no fazer científico, pois assim podem ser levantadas hipóteses que fazem sentido físico. Em seguida, ele propôs uma atividade em que os alunos deveriam levantar hipóteses sobre diversas ordens de grandeza, como a distância entre Vitória e São Paulo, o tamanho de um poste de rua comum, entre outros. Todos os alunos se envolveram e participaram ativamente da atividade. Werner, Enrico, Albert, Peter e Emmy participaram com 10, 8, 7, 16 e 7 intervenções, respectivamente.

Ao finalizar a atividade, o professor retomou o espalhamento profundamente inelástico entre um elétron e um próton, relacionando-o à colisão inelástica da Mecânica Newtoniana com a qual os estudantes já tinham familiaridade. Albert relacionou a situação

com a de duas bolas que se movem juntas em um jogo de sinuca, demonstrando total entendimento da situação. Em seguida, o professor retomou o raciocínio usado na exploração das diferentes seções de choque entre as partículas alfa e a folha de ouro, considerando os átomos de Thomson e o de Rutherford.

Ele então utilizou o mesmo raciocínio para lidar com o espalhamento elétron-próton em questão. Ele comentou como a obtenção da seção de choque menor do que a esperada para o caso do próton pontual, como considerado por Rutherford, forneceu a evidência necessária para a existências de subestruturas nos prótons. Aqui novamente percebemos como o uso de uma linha de raciocínio já consolidada pelos alunos pode ajudar a pensar sobre um fenômeno diferente. Os estudantes já haviam relacionado como uma seção de choque para o átomo de Rutherford menor do que a esperada pelo átomo de Thomson forneceu a ideia de subestruturas no núcleo atômico. Agora, os estudantes consideraram apenas o próton. Como a seção de choque elétron-próton foi novamente menor do que a esperada para o caso do próton pontual, os estudantes logo inferiram que o próton deveria então conter subestruturas: os quarks. Seguindo no mesmo raciocínio, poderíamos eventualmente descobrir que os quarks, por sua vez, também possuem subestruturas, ou seja, são compostos. Inclusive, existem propostas teóricas nessa direção, mas experimentos ainda não obtiveram nenhuma evidência para subestruturas dos quarks.

O docente seguiu com a aula apresentando os tipos de quarks existentes como subestruturas dos prótons e dos nêutrons. Ele comentou que são formados por três quarks, e propôs que os estudantes encontrassem suas constituições avaliando as cargas elétricas fornecidas para os quarks *up* (*u*) e *down* (*d*). Enrico e Albert se interessaram pela atividade e apresentaram seus cálculos para a turma, usando como justificativa o fato de o próton ter carga elétrica +1 e o nêutron ter carga elétrica nula.

O professor comentou como a descoberta, aparentemente sem explicação a partir dos conhecimentos da época, de diversas partículas em colisores nas décadas de 40 e 50 deu início a ideias sobre os quarks, com (Murray) Gell-Mann o primeiro que sugeriu os quarks. A combinação entre esses quarks poderia fornecer a diversidade de partículas que eram encontradas.

Os alunos lembraram a tabela do Modelo Padrão da primeira aula de introdução e também de outra sequência de aulas, ministrada por outro professor também dentro do contexto do projeto de extensão “Universo na Escola”. Eles levantaram hipóteses sobre quantos tipos de quarks seriam, bem como sobre a composição de outras partículas. Alguns se confundiram tentando encontrar a composição para pósitrons e elétrons, e o professor aproveitou para comentar que estas eram partículas elementares sem subestruturas e, por isso, não eram formadas por quarks. O docente aproveitou esse momento para também introduzir o conceito de hádrons como partículas que são formadas por quarks, relacionando este nome ao já mencionado Grande Colisor de Hádrons, o LHC, na Suíça.

A aula seguiu com a introdução da propriedade de carga cor para os quarks, enfatizando que o uso do nome “cores” não tinha qualquer relação com as cores de fato das partículas mas era somente um uso do sistema já existente RGB (*red-green-blue*) para facilitar a identificação e a organização dessas cargas. Por exemplo, a combinação de três quarks ou um quark e seu antiquark geraria um objeto branco ou neutro de carga cor. A relação dessa nova carga cor com uma nova interação fundamental na Natureza, a interação forte, foi apresentada em analogia com a relação da carga elétrica e a interação eletromagnética. Quando o professor comentou que os quarks conversariam entre si trocando mediadores dessa interação forte, Werner sugeriu que estes seriam os fótons. Notem como, apesar de o aluno ter levantado uma hipótese incorreta, a sugestão do fóton como mediador da interação forte sugere a compreensão do termo “mediador” pelo aluno. Isso se deve ao fato de que ele poderia ter sugerido diversas outras partículas, mas optou pela escolha do fóton, que sabemos ser um mediador, não da interação forte em si, mas da eletromagnética. O professor então lembrou o fóton como mediador da interação eletromagnética e introduziu os glúons como mediadores da interação forte entre os quarks.

O professor aproveitou para mostrar alguns diagramas de Feynman para a interação forte e ressaltou como ela é bem mais complicada do que a eletromagnética. Ele comentou que os fótons, por não possuírem carga elétrica não poderiam interagir entre si. Já no caso dos glúons, como eles possuem carga cor, poderiam interagir entre si. Por isso, existem ainda mais diagramas de Feynman para essa interação. Nesse momento, os alunos buscaram compreender as trocas de carga cor em vários desses diagramas e demonstram muito interesse em descobrir como ocorre a interação entre os quarks dentro dos prótons e dos nêutrons, e não entre prótons e nêutrons diretamente, como o caso da interação forte residual discutida no segundo bloco de aulas da sequência.

Já no final da aula o professor instigou dois momentos provocados por dúvidas dos alunos. A primeira pergunta elaborada para propor uma discussão foi “*Por que só existem partículas formadas por 2 ou 3 quarks?*”, e a segunda “*Por que não conseguimos ver um quark isolado?*”. Para responder a primeira delas, a estudante Emmy levantou a hipótese de que a resposta deveria ter alguma relação com a cor branca. Na mesma direção da colega, Enrico comentou que 2 quarks *u* e 1 quark *d* seria “(...) *completo*.”, o que foi ainda complementado por Albert, que disse que seria completo com relação às cargas. O professor mencionou que eles estavam na direção certa e Werner finalizou dizendo que os efeitos da carga cor “*São constantes porque [os objetos que observamos] são brancos*.”. Por “constantes”, acreditamos que o aluno quis dizer que não geram efeitos no nosso dia a dia. O professor concordou com Werner e aproveitou para sistematizar a discussão dando ênfase ao fato de que só existem objetos brancos na Natureza.

Para estimular a discussão sobre a segunda pergunta, o professor disse que o entendimento da solução para a primeira pergunta fornece pistas para a solução da segunda.

Demonstrando certa dificuldade, os alunos não conseguiram progredir de imediato. O professor auxiliou mostrando um méson, objeto formado por um quark e um antiquark, e sugeriu que eles pensassem sobre o que aconteceria quando tentássemos separar o quark do antiquark. Os estudantes novamente se mostraram confusos. O professor estimulou os alunos a pensarem sobre a energia que é preciso fornecer para separar o quark do antiquark. Ele comentou também como os quarks estão sempre trocando glúons e, à medida que mais energia é dada para separar esses quarks, os glúons interagem cada vez mais fortemente. Dessa forma, chega um ponto em que tanta energia é dada ao sistema, que ela é suficiente para criar outro méson. Werner ficou confuso e perguntou o porquê de terem sido criados um quark e um antiquark, e não outra combinação. Albert comentou que só poderia ser criada alguma coisa com carga cor zero e que por isso não dava para ver os quarks separados, o que demonstra entendimento da questão exposta pelo professor. O professor aproveitou esse comentário para sistematizar a discussão, reforçando a atenção para a impossibilidade de observar objetos com carga cor diferente de branca que é, justamente, o que impede a separação dos quarks e, conseqüentemente, sua observação isolada na Natureza.

No último momento da aula, o professor relacionou a interação forte entre quarks, uma das quatro interações fundamentais na Natureza, com a interação forte residual entre prótons e nêutrons, que apareceu nas aulas sobre energia nuclear do segundo bloco de aulas. O professor traçou uma analogia com a interação eletromagnética entre moléculas. Werner trouxe, com autonomia, a informação de que a interação que mantém as moléculas ligadas é a eletromagnética apesar de parecer estranho pois moléculas são neutras. O professor confirmou a fala do aluno e a sistematizou explicando que, quando elas estão muito próximas, há uma sobreposição de suas nuvens eletrônicas e a configuração passa a não ser mais neutra, permitindo a interação eletromagnética entre os elétrons e prótons que as constituem. Da mesma forma, prótons e nêutrons não têm carga cor, ou seja, são brancos. No entanto, quando estão muito próximos, os quarks que lhes compõem interagem entre si trocando glúons, e os prótons e nêutrons eventualmente interagem trocando um pión, partícula mediadora da interação forte residual como lembrado por Enrico.

A sétima aula manteve uma média de intervenções similar a das aulas 5 e 6. No total foram 137 intervenções com uma média de 27,4 delas por aluno. Com 15 momentos e 19 sub-momentos, obtemos 9,1 e 7,2 intervenções por momento e sub-momento, respectivamente. Dessa vez, Werner voltou a ser o mais participativo, com 52 intervenções em 18 dos 20 sub-momentos. Emmy foi a menos participativa, com 11 intervenções em 7 sub-momentos. Percebemos que a média não caracteriza esses dois resultados. No entanto, para Enrico, Albert e Peter, que participaram com 18 intervenções em 9 sub-momentos, 30 intervenções em 15 sub-momentos e 26 intervenções também em 9 sub-momentos, a média é representativa. Note o destaque para Albert que, novamente, participou ativamente dessa aula, sendo o segundo estudante mais participativo. Notamos também que essa foi a

primeira aula em que o estudante menos participativo apresentou considerável interação durante a aula. De fato, enquanto nas aulas anteriores, os alunos que menos participaram atingiram um máximo de 5 intervenções durante toda a aula, aqui, Emmy participou 11 vezes.

Os indicadores de alfabetização mais frequentes foram: seriação de informações (**AC-I1A**), classificação de informações (**AC-I1C**) e levantamento de hipóteses (**AC-I3A**). Eles foram mais caracterizados pelas seguintes operações epistemológicas: definição (**AC-II4**) e classificação (**AC-II5**). Todos esses indicadores apareceram com mais frequência justamente no momento da atividade sobre ordens de grandeza. Isso corrobora o uso de atividades exploratórias como facilitadoras de diversos elementos do fazer científico, o que geralmente não ocorre em modelos tradicionais de ensino expositivo. Com relação às operações de argumento, houve maior incidência de dados (**AC-III1**) e garantias (**AC-III3**), caracterizados pelos níveis argumentativos 0 e 1.

### 3.1.4 Aulas 8, 9 e 10: A interação fraca, o bóson de Higgs e além do Modelo Padrão da Física de Partículas

#### • Aula 8: O decaimento beta e o mistério da energia desaparecida

A oitava aula da sequência iniciou o bloco de aulas sobre tópicos ainda mais recentes da Física de Partículas: a interação fraca, os sucessos e os problemas abertos do Modelo Padrão da Física de Partículas. A aula contou com uma boa adesão dos estudantes já na reta final da sequência. Estiveram presentes seis estudantes: os usuais Werner, Albert, Marie, Peter e Emmy, e também Chien, que compareceu na quarta e na quinta aulas da sequência. O primeiro momento foi de breve recapitulação dos decaimentos alfa, beta e gama. Dessa forma, o professor conseguiu relembrar as ideias principais para dar um maior foco ao decaimento beta no restante da aula, pois este se relaciona diretamente à interação fraca. Todos os alunos participaram desse momento inicial, relembrando as ideias principais discutidas em aulas anteriores.

Cabe ressaltar que o retroprojektor da escola novamente não funcionou. Os estudantes demonstraram insatisfação com esse acontecimento e comentaram que essa era a regra, manifestando descontentamento com a estrutura disponível na escola. No entanto, os seis alunos propuseram sentarem mais próximos uns dos outros, com o professor usando a tela de seu próprio laptop para mostrar slides, figuras, tabelas, entre outros, necessários durante a aula. O professor acatou a ideia e prosseguiu com a aula dessa forma, da mesma forma que o ocorrido na sexta aula da sequência.

No momento seguinte, o professor retomou a utilidade do decaimento beta para a datação de fósseis, por exemplo. Chien comentou corretamente que o processo consiste na transformação de um nêutron em um próton e o professor aproveitou para expor a

situação-problema da aula: na época da descoberta do decaimento, os pesquisadores ficaram intrigados pois o elétron liberado possuía energias cinéticas diversas quando o esperado era uma energia cinética fixa. O docente então perguntou aos alunos se eles conheciam alguma expressão para calcular a energia cinética do elétron. Os estudantes, em dúvida, não chegaram em um acordo para a expressão. O professor então instigou que eles refletissem sobre unidades de medida de diversas grandezas relacionadas à energia cinética para chegarem em uma expressão por conta própria, sem apenas tirá-la de memória, enfatizando a importância da compreensão física dos processos e suas relações em detrimento à pura memorização de fórmulas. O mais próximo que os estudantes chegaram foi relacionar a energia cinética com a massa e a velocidade da partícula em questão, mas não concluíram o comportamento com o quadrado da velocidade. No entanto, foi um momento de grande participação dos estudantes e interessante também por terem demonstrado que esta parecia ser a primeira vez em que foram estimulados a pensar sobre relações entre unidades de medida.

O professor acrescentou o comportamento com o quadrado da velocidade e os alunos puderam discutir as energias relacionadas a cada etapa do decaimento. Eles encontraram as expressões literais para a conservação de energia e de quantidade de movimento no processo, e Marie comentou que encontrar as expressões literais não era tão difícil, mas apenas diferente do que trabalhar com números, como estão acostumados no ensino médio. O professor comentou que, a partir dessas expressões, a energia cinética final do elétron poderia ser determinada e que esta deveria ser fixa uma vez que todas as outras grandezas envolvidas são conhecidas, como as massas do nêutron, do próton, do elétron, e também, de acordo com comentário de Marie, as velocidades do nêutron e do próton. O professor retomou como, durante as observações, os cientistas encontraram elétrons com energias cinéticas finais diversas, menores do que a esperada. Ou seja, parte da energia havia desaparecido.

O estudante Werner levantou a hipótese de que talvez parte da energia foi transferida para alguma outra partícula. O professor comentou que a hipótese de Werner foi certa e que, justamente há quase 90 anos, (Wolfgang) Pauli propôs a existência de uma partícula sem carga elétrica e sem massa para solucionar problema: o neutrino. Quando Werner fez um julgamento sobre o funcionamento da Ciência dizendo que tal previsão seria inédita, pois geralmente a teoria se adequa aos dados, o professor mencionou que a teoria precisa se adequar aos dados quando eles existem e, além disso, também fazer novas previsões. Dessa forma, ele enfatizou como previsões teóricas são extremamente relevantes para o avanço e consolidação ou refutação de teorias científicas. O docente também lembrou como o antielétron havia sido previsto teoricamente e comentou que o neutrino, apesar de previsto em 1930, só foi detectado em 1956.

Em seguida, o professor apresentou uma imagem de detecção de um neutrino em uma câmara de bolhas de hidrogênio e propôs que os estudantes pensassem por

quais interações o neutrino não poderia interagir, tomando como base suas características discutidas em sala e as partículas envolvidas no processo. Albert e Marie disseram que o neutrino não poderia interagir eletromagneticamente porque não tem carga elétrica e Werner disse que ele não poderia trocar glúons pois não era formado por quarks, ou seja, não poderia interagir pela interação forte. Demonstrando certa confusão, Werner levantou a hipótese de que o neutrino pudesse interagir através de píons. No entanto, o aluno confessou que não tinha uma explicação que justificasse sua hipótese. Pensamos que ele levantou essa hipótese simplesmente porque um pión era um dos produtos da interação apresentada na imagem em questão. O professor esclareceu a confusão e sistematizou as discussões.

Em seguida, o docente introduziu a interação fraca e Werner perguntou porque ela não seria a interação gravitacional. Percebemos um alto grau de investimento no aprendizado e o uso de estratégias com conexão de ideias, com o estudante demonstrando assimilação da intensidade fraca da interação gravitacional quando comparada a outras interações, relacionando-a à interação fraca. O professor explicou que a interação fraca tinha esse nome pois era mais fraca quando comparada à forte e à eletromagnética, mas que a interação gravitacional era ainda mais fraca do que a interação fraca, o que fez com que Peter exclamasse “*Nossa!*”. O professor aproveitou para comentar que o fato de a gravitação ser tão mais fraca do que as outras interações constituía um dos tópicos mais pesquisados atualmente na área, sobre o qual eles também poderiam pesquisar para apresentar na última aula da sequência. Marie, usando uma argumentação do nível 3 (**AC-IV3**), aproveitou para confirmar se a gravitação era realmente mais relevante para objetos maiores, enquanto a fraca ocorreria mais a nível de partículas, o que foi confirmado pelo docente.

O momento seguinte foi de analogia da interação fraca com as outras interações já vistas. O docente lembrou que glúons e fótons são os mediadores da interação forte e eletromagnética, respectivamente, e Werner, de maneira autônoma, comentou que mediadores são responsáveis por trocas de partículas e se associam a campos. Chien e Marie então concluíram que também deveria existir alguma partícula mediadora da interação fraca. Assim, o docente aproveitou para introduzir os bósons  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z$ , enfatizando suas cargas elétricas, comentando que eles também foram previstos pela teoria e somente observados em experimentos anos depois. Destacamos que, durante essas discussões, os estudantes Peter e Emmy tiveram que deixar a sala, com aproximadamente 30 minutos de aula.

Em seguida, ocorreu a atividade “Encontrando cargas elétricas a partir dos diagramas de Feynman”, que contou com uma ótima adesão de Werner, Marie e Chien, com 6, 16 e 8 intervenções cada. Nela, o professor incentivou a exploração do decaimento do nêutron em um próton, um elétron e um antineutrino do elétron. Ele lembrou as cargas elétricas dos quarks que compõem os prótons e os nêutrons, e pediu que os

estudantes deduzissem qual deveria ser a carga do bóson  $W$  que intermedeia esse decaimento. Inicialmente Chien levantou a hipótese de que seria um  $W^-$ , enquanto Werner sugeriu um  $W^+$ . Após trocas de ideias, Werner argumentou que a carga  $-2/3$  do quark  $d$  foi convertida em uma carga positiva  $+1/3$  do quark  $u$  e, por isso, a diferença que sobra é positiva. Chien continuou dizendo que houve um ganho de  $+3/3$ , ou seja,  $+1$  de carga. Werner então concluiu que essa transformação de um nêutron em um próton deve ter emitido uma carga negativa, diferente de sua concepção inicial sobre o problema, ao que o professor complementou “*Ele [o nêutron] não pode criar carga do nada.*”. Marie relatou já ter visto o diagrama e finalizou o momento dizendo que agora finalmente tinha entendido o porquê do  $W^-$ . Esse estímulo à troca de ideias entre os próprios estudantes fornece-lhes a autonomia necessária para explorar diversas ações do fazer científico: levantar hipóteses, testá-las, avaliar a plausibilidade das informações e pensamentos próprios e/ou de colegas. Dessa forma, o processo de ensino-aprendizagem torna-se relevante para os alunos, desde que estimulados por questões de seus interesses ou que se tornam interessantes através de novos olhares promovidos pela mediação do professor.

No último momento da aula o professor explorou as características da interação fraca. Ele comentou que ela também é de curto alcance, como a forte, mas que seus mediadores possuem massa, ao contrário dos fótons e dos glúons. O professor comentou que suas massas são de aproximadamente 100 vezes a massa de um próton, e Werner demonstrou autonomia e investimento no aprendizado quando relatou estar perdido com essa informação. Ele perguntou, usando argumentação do nível 3 (**AC-IV3**), como essas partículas poderiam possuir uma massa maior do que as partículas que as originaram. O professor explicou que seu raciocínio estava correto na análise de um processo em que um próton emite um bóson  $W$  e outras partículas em conjunto. No entanto, para os processos discutidos em sala, nos quais os  $W$ s e o  $Z$  só apareciam intermediando a interação, não teria problema algum, e eles veriam uma explicação mais aprofundada na próxima aula.

Albert novamente retomou a discussão relatando não compreender o porquê de o neutrino estar no diagrama analisado, usando argumentação no nível 3 (**AC-IV3**). Marie lembrou que ele precisava estar ali para dar conta da conservação de massa, o que foi corrigido por Chien, que falou “*Da energia.*”. Em seguida, Albert perguntou sobre as setas nos diagramas e o professor explicou que antipartículas eram simbolizadas com setas na direção oposta à do tempo, geralmente saindo dos vértices, o que simbolizaria a interpretação das antipartículas como partículas andando para trás no tempo, que já havia sido abordada nas primeiras aulas da sequência. Albert seguiu com uma pergunta profunda sobre o porquê da existência do processo envolvido na atividade (um nêutron decaindo em um próton, um elétron e um antineutrino do elétron). O professor comentou que essa seria uma interação possível e existente na Natureza, como várias outras que eles já discutiram mas que, no entanto, os físicos ainda não possuem uma explicação satisfatória para a existência de quatro interações da Natureza. O docente ainda disse que só se sabe

que a Natureza escolheu aparecer, pelo menos para nós, a partir de quatro interações e observamos fenômenos relacionados a elas, mas que algum dia poderíamos formular e testar uma teoria mais fundamental que nos forneça uma explicação satisfatória para o porquê da existência de quatro interações fundamentais na Natureza, como a Teoria de Cordas. Por fim, o professor sistematizou as discussões, dando ênfase na necessidade da interação fraca para explicar vários outros fenômenos que não são compreendidos apenas com base nas outras interações, como o próprio decaimento beta.

Com um total de 197 intervenções, a aula contou com o maior número de intervenções pelos alunos em toda a sequência. As médias nos 11 momentos e 20 sub-momentos foram de 17,9 e 9,9 intervenções, respectivamente. Apesar de altas médias por momento e sub-momento da sequência, a média de intervenções por aluno, no entanto, ficou apenas em segundo lugar na sequência, com 32,8 intervenções por aluno. A última aula, como veremos, com um total de intervenções similar a dessa aula, teve uma média de participação por aluno muito maior, de 48,5 intervenções por aluno. Marie foi quem mais participou da oitava aula, com 69 intervenções em 16 dos 20 sub-momentos. Em seguida tivemos Werner, com 56 participações em 16 sub-momentos, e Albert, com 37 participações em 7 sub-momentos. Chien, que havia participado pouco das aulas 4 e 5 em que também esteve presente, agora aumentou sua participação para 26 intervenções em 7 sub-momentos. Já Peter e Emmy participaram apenas 5 e 4 vezes, ambos em 4 sub-momentos, respectivamente.

Nessa aula todos os indicadores de alfabetização científica estiveram presentes significativamente, com incidências média e alta. Os de alta incidência foram: seriação de informações (**AC-I1A**), classificação de informações (**AC-I1C**), raciocínio lógico (**AC-I2A**), levantamento de hipóteses (**AC-I3A**), teste de hipóteses (**AC-I3B**) e previsão (**AC-I3D**). As caracterizações mais frequentes foram: indução (**AC-II1**), dedução (**AC-II2**), causalidade (**AC-II3**) e plausibilidade (**AC-II8**). A seriação de informações ocorreu no primeiro momento em que lembraram os decaimentos alfa, beta e gama, na atividade com os diagramas de Feynman, e no último momento em que discutiram sobre as características da interação fraca. A classificação de informações foi relevante também nesses momentos. Os levantamento e teste de hipóteses foram mais perceptíveis durante a discussão sobre a importância das unidades de medida, no contexto do decaimento beta. Já o raciocínio lógico e a previsão apareceram de forma homogênea ao longo da aula. Com relação às operações, a indução foi mais frequente durante a discussão sobre as características da interação fraca. Já a dedução ocorreu mais durante o momento sobre a importância das unidades de medida. A causalidade apareceu com maior incidência durante os três últimos momentos da aula, quando discutiu-se a troca de  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z$  na atividade sobre os diagramas de Feynman e as características da interação fraca. A plausibilidade foi recorrente em diversos momentos da aula: durante a discussão sobre a importância das unidades de medida, na atividade sobre os diagramas de Feynman e no último momento sobre as características

da interação fraca.

Com relação às operações de argumento, as maiores incidências ficaram por conta de dados (**AC-III1**) e garantias (**AC-III3**), com níveis argumentativos 0 e 1. No entanto, em 4 ocasiões durante a aula, das quais 3 foram citadas na análise da aula acima, os níveis argumentativos apresentados se encaixaram no nível 3.

### • Aula 9: O bóson de Higgs e o Modelo Padrão da Física de Partículas

A penúltima aula da sequência contou com a participação de seis estudantes: Werner, Albert, Marie e Peter, além de Richard, colega de Werner que havia participado da terceira aula, e de um novo aluno, Paul, também amigo de Werner. Durante o primeiro momento, o professor revisou a existência de neutrinos e a necessidade da interação fraca. Ao contrário das aulas anteriores, em que ocorreram diversas trocas com os alunos, nesta aula o professor adotou uma metodologia um pouco mais expositiva. Uma vez que restavam apenas essa aula e a próxima, a décima e última aula da sequência, que seria mais voltada às apresentações dos estudantes, o professor quis garantir que todos os tópicos preparados fossem abordados e não postergados para a última aula, eventualmente a sobrecarregando.

Como dito no final da aula anterior, o professor retomou uma pergunta de Werner sobre como é possível que o decaimento beta de um nêutron originasse o próton, o elétron e o antineutrino do elétron com uma partícula  $W$  intermediária mais pesada do que o próprio nêutron inicial. O professor explicou que, quando as partículas são intermediárias nos diagramas, ou seja, não aparecem na primeira ou última etapa do processo, elas recebem o nome de partículas virtuais e podem ter diversas características distintas das partículas reais que lhe dão nome. Ele enfatizou que, quanto mais características próximas às das reais essas partículas virtuais possuíssem, mais provável seria o processo que as envolvem. Quando elas possuem exatamente as mesmas características das partículas reais, o processo torna-se altamente provável e é chamado de “ressonância”. O professor apresentou uma analogia do fenômeno de ressonância para partículas com o fenômeno em que uma pessoa quebra uma taça de vidro com seu próprio canto. Quando a nota atingida corresponde à frequência de vibração dos átomos da taça, o movimento de vibração é amplificado, fazendo com que a estrutura cristalina da taça não aguente. O professor aproveitou para conectar essa ideia com as descobertas de partículas, por exemplo, no colisor de partículas LHC. Ele mencionou que, quando a energia da colisão se aproxima da massa de partículas reais, aparecem picos de ressonância, nos quais a seção de choque aumenta, indicando a descoberta de uma nova partícula.

Em seguida, o professor propôs uma atividade em que os estudantes obtivessem as massas da partícula  $Z$  e de uma outra partícula que eles ainda não vista, a partir dos gráficos de suas ressonâncias. Apareciam também picos relacionados a outras partículas nos gráficos utilizados. O estudante Werner primeiramente se confundiu com os pontos

experimentais do primeiro gráfico. Ele pensou que cada ponto estaria relacionado a uma partícula e o professor mencionou que aqueles eram os pontos experimentais obtidos, com as partículas se relacionando apenas aos picos e não a todos os pontos experimentais. Marie observou o primeiro gráfico e sugeriu, corretamente, que a massa de  $Z$  deveria ser maior do que a de  $W$ , pois seu pico se encontrava mais à direita do que o pico de  $W$  no eixo  $x$  do gráfico, referente à massa da partícula final proveniente da energia de colisão entre as partículas iniciais. Werner então levantou a hipótese de que a massa de  $Z$  estaria entre 80 e 120 GeV e o professor pediu que eles fossem ainda mais precisos, pois o gráfico permitia essa precisão. O estudante Albert foi certo ao argumentar sobre o valor de 92 GeV uma vez que a massa conhecida para  $Z$  é 91,2 GeV. O professor perguntou se todos acompanharam a manifestação de Albert, tendo recebido somente respostas positivas. O segundo gráfico para determinar a massa da partícula  $J/\psi$ , até então desconhecida, possuía escala logarítmica. Mesmo assim, Marie identificou um intervalo possível para a massa dessa partícula e um valor mais aproximado foi novamente dado por Albert, 3,0 GeV, sendo que a massa adotada é 3,1 GeV. Albert quis ir além perguntando sobre os outros picos nos gráficos e o professor indicou que eles seriam processos mais favoráveis a partir do momento em que as energias de colisão correspondentes fossem atingidas.

No momento seguinte, o professor retornou ao gráfico de fusão e fissão de aulas anteriores, e comentou como a formação de núcleos mais pesados ocorre: com a interação fraca sendo a responsável por processos de fusão nuclear no Sol, em que dois átomos de hidrogênio se fundem em um núcleo de deutério e, depois, processos de fusão devido à interação forte. O professor aproveitou para ressaltar a importância das primeiras fusões no Sol devido à interação fraca para a geração de vida na Terra.

O professor então apresentou uma tabela incompleta do Modelo Padrão da Física de Partículas, apenas com uma primeira coluna que representava uma família de quarks e léptons (quarks *up* e *down*, elétron e neutrino do elétron) e uma coluna com os mediadores das interações eletromagnética, forte e fraca (fóton, glúons,  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z$ ). Ele enfatizou como o nosso redor é composto basicamente por essa primeira coluna. Albert e Werner disseram que já tinham visto a tabela, lembrando a primeira aula da sequência, em que o professor a apresentou brevemente para estimular os alunos para a temática das aulas. Em seguida, o professor comentou que a Natureza escolheu fazer duas cópias dessa primeira coluna, em que todas as partículas teriam as mesmas características das partículas da primeira coluna, com a única distinção de que as partículas massivas da segunda coluna teriam massas maiores do que às da primeira coluna e as da terceira coluna teriam massas maiores do que às da segunda coluna. Ele enfatizou que não podem existir mais do que essas 3 famílias ou colunas por inconsistências com outras observações, mas que ninguém ainda conseguiu explicar a origem para somente essas 3 famílias e não mais.

O professor deixou uma interrogação proposital no último quadro da tabela e o estudante Richard perguntou qual partícula se encaixaria nele. O docente lembrou

como as descobertas de diversas substâncias encontradas no mundo em apenas poucos átomos, sumarizadas na tabela periódica da Química, foram excelentes para uma melhor compreensão da constituição do Universo e que a tabela do Modelo Padrão conseguiu ir ainda além, pois reduziu essa descrição em termos de pouquíssimas partículas. Assim, o professor introduziu a última peça do Modelo Padrão: o bóson de Higgs. Quando Paul perguntou quem o descobriu, comentando pensar ter sido descoberto por um estudante de faculdade, o docente respondeu que o bóson de Higgs foi encontrado recentemente, em 2012, na grande colaboração internacional do LHC, na Suíça. Aproveitando o momento, o docente ainda comentou como, cada vez mais, pelo menos na área da Física de Partículas, são necessárias grandes colaborações científicas envolvendo muitos pesquisadores ao redor do mundo para realizar novas descobertas. Paul aproveitou para perguntar se essa colaboração não seria uma prova de que a humanidade está se esforçando para evoluir, e complementou “*Porque as coisas fácil [sic] já foram descobertas, agora tem que descobrir o mais difícil.*”. O professor concordou e comentou como o aspecto colaborativo internacional é algo fundamental para a Física de Partículas e para o desenvolvimento científico geral, pois mais mentes trocando ideias proporcionam mais hipóteses a serem analisadas.

Para explicar a importância do Higgs para o Modelo Padrão, o docente lembrou como a eletricidade foi unificada ao magnetismo, originando o eletromagnetismo. Ele lembrou as características das interações eletromagnética e fraca, e disse como elas duas, apesar de também aparentemente distintas, eram unificadas na interação eletrofraca, o que surpreendeu os estudantes, principalmente Albert e Marie. O professor comentou que, no entanto, essa unificação era mais complicada que a do eletromagnetismo, pois o fóton não tem massa enquanto as partículas mediadoras da interação fraca possuem massa. Ele continuou dizendo que o Higgs é justamente o responsável por fornecer massa às partículas mediadoras da interação fraca e, inclusive, à todas as outras que interagem com o campo associado a ele, o campo de Higgs.

Para facilitar o entendimento dos estudantes, o professor utilizou diversas animações simulando uma festa entre físicos, que representariam o campo de Higgs [TED-Ed, 2013]. Duas situações foram apresentadas. Na primeira delas, um funcionário da Receita Federal entrava pela porta principal do salão da festa, conseguindo atravessar todo o salão lotado de físicos e chegar ao bar. Esse funcionário seria o análogo de uma partícula que não interage com o campo de Higgs. Como as pessoas em geral não se importariam em conversar com um funcionário da Receita Federal no meio de uma festa, este funcionário não atraiu a atenção dos físicos na festa. No entanto, na segunda situação, o próprio Peter Higgs, um dos físicos que propôs a existência do bóson de Higgs, entrava no salão. Como ele é famoso entre os físicos, ao tentar atravessar o salão, era constantemente parado, pois todos queriam pegar seu autógrafo ou bater *selfies* com ele. O Higgs seria um exemplo de uma partícula que receberia massa através de sua interação com o campo de Higgs, os físicos da festa.

Os estudantes se divertiram com a animação. Comentaram que a massa fornece uma resistência ao movimento e assim compreendiam a analogia feita na animação. O professor deu o exemplo do fóton como uma partícula que não interage com o Higgs, ao que Marie concluiu corretamente “*Aí [o fóton] não tem massa.*”. Quando o professor resumiu o chamado “mecanismo de Higgs”, o estudante Werner concluiu “*Partículas que não tinham massa agora passam a ter massa por causa da interação.*”, demonstrando pleno entendimento da situação. O docente informou que esse mecanismo do Higgs, responsável dar massa às partículas, era também conhecido como “a quebra da simetria eletrofraca”, termo técnico utilizado. Em seguida, o professor mostrou o gráfico da ressonância associado à descoberta do Higgs no LHC e pediu que os alunos encontrassem sua massa, como já haviam feito para outras partículas no início da aula. Werner, Albert e Marie chegaram no valor de, aproximadamente, 125 GeV, considerado atualmente justamente o valor da massa do Higgs, demonstrando assim entendimento sobre como obter as massas das partículas em gráficos atuais utilizados amplamente pela comunidade científica da área.

Os últimos momentos da aula foram para abordar os maiores sucessos do Modelo Padrão e os problemas ainda abertos. O professor mencionou que o Modelo Padrão previu uma propriedade do elétron chamada momento magnético com uma precisão de 12 algarismos, previu a existência de diversas partículas (e.g.  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ , neutrinos, Higgs), entre outros. Por exemplo, o Higgs foi previsto em 1964 e só foi observado em 2012, informação que recebeu a exclamação de Werner “*Impressionante!*”. O docente também comentou como o Modelo Padrão é capaz de explicar toda a história do Universo até quando este tinha apenas  $10^{-12}$  segundos, o que surpreendeu os estudantes.

No entanto, o Modelo Padrão também possui limitações. Algumas delas foram lembradas e outras apresentadas pelo professor. Ele lembrou, por exemplo, que não sabemos porque a gravitação é tão mais fraca do que as outras interações, citando como existem tentativas de explicar esse fenômeno através da existência de dimensões extras. O docente também lembrou que os cientistas não sabem o porquê da existência de 3 famílias de quarks e léptons, bem como da hierarquia já mencionada entre elas. O professor mencionou ainda o problema do setor escuro do Universo, com a matéria e a energia escura sendo responsáveis por 95% do conteúdo do Universo, enfatizando como o Modelo Padrão seria uma teoria de quase tudo mas também de quase nada, pois explica apenas 5% do Universo. Por fim, o professor mencionou o problema da existência de mais matéria do que antimatéria no Universo, o que também não é explicado pelo Modelo Padrão, e também o fato de que ele não é capaz de incluir uma descrição para a interação gravitacional entre partículas subatômicas. Ou seja, ainda não possuímos uma teoria da gravitação quântica, a qual necessitamos se quisermos compreender a gravitação em uma escala quântica para, por exemplo, estudar o interior de buracos negros ou a origem do Universo. Em todo esse momento final os estudantes riram, conversaram entre si, demonstrando clara empolgação com todos os tópicos mencionados.

O professor finalizou a aula deixando um estímulo aos estudantes. Ele comentou que ainda existem diversos territórios inexplorados e que, através de colaborações cada vez mais frequentes na Ciência contemporânea, os estudantes poderiam ser os responsáveis pelas próximas grandes descobertas da Física. É fundamental que os estudantes sejam estimulados e sintam-se capazes de deixar suas contribuições para o mundo e, certamente essa fala final do professor foi muito bem recebida por eles, que sorriram e até se levantaram para aplaudir a aula.

Como já enfatizamos, essa aula foi um pouco mais expositiva, pois o professor não quis deixar muitos tópicos para a décima e última aula da sequência, mas sim dedicar mais tempo para as apresentações dos estudantes. Com menos trocas entre professor e alunos, houve 92 intervenções, com uma média de 15,3 intervenções por aluno. Com 12 momentos e 15 sub-momentos, as médias foram 7,6 e 6,1 intervenções por momento e sub-momento, respectivamente. Os alunos mais participativos foram Werner, Marie e Albert, com 31 participações em 11 sub-momentos, 24 participações em 8 sub-momentos e 13 participações em 6 sub-momentos, respectivamente. O aluno Paul, que participou pela primeira vez, interveio em 14 situações em 5 sub-momentos. Já Peter e Richard participaram com apenas 4 intervenções em 3 sub-momentos e 6 intervenções em 4 sub-momentos, respectivamente. A incidência de Richard é compreendida quando lembramos que ele participou apenas de uma única aula antes da presente aula, ainda no primeiro bloco de aulas, a terceira aula da sequência.

O indicador de alfabetização científica mais presente na aula foi o raciocínio proporcional (**AC-I2B**), nos momentos de discussão sobre partículas virtuais, o pico de ressonância e a massa da partícula  $Z$ , e também do papel do Higgs em dar massa às partículas. As operações epistemológicas mais presentes foram: causalidade (**AC-II3**), apelo ao atributo (**AC-II6C**), apelo à autoridade (**AC-II6D**) e o compromisso com consistência (**AC-II7C**). A primeira ocorreu principalmente no momento em que discutiam sobre o papel do Higgs em dar massas às partículas, enquanto os apelos ao atributo e à autoridade apareceram quando discutiu-se sobre cargas e massas das partículas e na discussão sobre a descoberta do bóson de Higgs, respectivamente. Já o compromisso com consistência apareceu em diversos momentos da aula. Com relação às operações de argumento e os níveis de argumentação, destacamos os dados (**AC-III1**) e o nível 0. Quando Werner buscou explicar o mecanismo de Higgs, ele alcançou o único nível 3 de argumentação, com a presença de conclusão (**AC-III2**), garantias (**AC-III3**) e apoios (**AC-III4**).

#### • Aula 10: Além do Modelo Padrão da Física de Partículas

A última aula da sequência contou com a participação de 4 estudantes: Werner, Albert, Marie e Richard. Marie foi a única estudante que preparou um seminário e a primeira parte da aula foi dedicada à sua apresentação sobre a matéria escura. Cabe

ressaltar que a aluna tinha preparado uma série de slides, porém o projetor da escola novamente não funcionou, como já havia ocorrido em aulas anteriores.

No começo de sua apresentação, Marie relatou sentir-se nervosa, mas foi tranquilizada pelo professor e pelos colegas, que a motivaram com frases como “Fica tranquila”, “*Pode respirar. Respira fundo.*” e “*Fica calma. Todo mundo aqui te conhece.*”. Um ambiente em que os estudantes se sentem à vontade para compartilhar suas ideias e pontos de vista é certamente frutífero para todos, o que se confirmou sobre o grupo de estudantes participantes dessa pesquisa. Com o apoio do professor e dos colegas, Marie se sentiu confiante e iniciou sua apresentação. Mesmo sem a projeção dos slides, a aluna demonstrou pleno domínio do tema. De início, ela comentou sobre as evidências para a existência da matéria escura. Para isso, ela esboçou o gráfico da velocidade de rotação em galáxias espirais, uma das evidências observacionais para a necessidade da matéria escura. Ela explicou como a observação indicava a existência de uma matéria que não podemos enxergar, comparando o gráfico com a adição de matéria extra ao esperado sem sua adição.

Ela continuou a apresentação mencionando como a existência da matéria escura é fundamental para a compreensão da formação de estruturas no Universo e para a existência do próprio planeta Terra. Caso contrário, como ela mesma explicou ao usar o exemplo de uma estrela, “*Ela [a estrela] tem como se fosse um combustível dentro dela que vai queimando conforme ela vai avançando no seu projeto de vida, até que chega um momento em que chega o seu fim. Se a matéria escura não existisse, esse ponto chegaria logo porque ia queimar muito rápido. (...) Então, se ela não existisse, o nosso Universo seria formado por estrelas e planetas gasosos imensos, como Júpiter.*”. Foi curioso o uso do termo “projeto de vida” para explicar sobre o processo de evolução das estrelas. Certamente isso é uma influência direta da disciplina “Projeto de Vida” na escola de tempo integral<sup>3</sup> à qual a estudante está matriculada.

No momento seguinte de sua apresentação, ela contemplou candidatos à matéria escura, mencionando dois deles: os MACHOs e os WIMPs. Ela comentou que o primeiro se referia a uma sigla em inglês para um objeto de massa tão grande, como um buraco negro, lembrando conceitos de outras aulas no contexto do projeto de extensão “Universo na Escola”, que abordaram a Relatividade Geral, a curvatura da luz pela gravidade,

<sup>3</sup> A disciplina “Projeto de Vida” integra o currículo em escolas do modelo “Escola Viva”, um programa implementado em 2015 em algumas escolas da rede pública estadual de ensino do Espírito Santo, cujo intuito é fornecer uma educação em turno único integral voltada à experiências educacionais amplas e profundas (cf. [ESCOLA VIVA, SEDU-ES]). A disciplina tem também sido incorporada em diversas outras escolas desde a implementação da lei nº 13.415/2017 do “Novo Ensino Médio” (cf. [BRASIL, 2017a; Novo Ensino Médio, 2017]), que alterou a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (cf. [BRASIL, 1996]), estabelecendo mudanças na estrutura do ensino médio. As principais delas foram a ampliação do tempo mínimo do estudante na escola de 800 horas para mil horas anuais (até 2022), uma nova organização curricular contemplando a Base Nacional Curricular Comum (BNCC) (cf. [BRASIL, 2017b; BNCC, Ministério da Educação]) e disciplinas voltadas para a construção do projeto de vida do aluno e para sua formação nos aspectos físicos, cognitivos e socioemocionais, como a disciplina em questão “Projeto de Vida”.

e o eclipse de Sobral. Em seguida, ela comentou sobre WIMPs, mencionando que esse seria um candidato em forma de partícula subatômica que interage pela interação fraca e gravitacional. Além desses tópicos, a aluna também abordou a distinção entre matéria e energia escura e, no final de sua apresentação, disse que não conseguiu compreender como a matéria escura poderia ser detectada uma vez que não podemos enxergá-la. Ela mencionou que leu uma reportagem que dizia que cientistas tentavam detectá-la indiretamente, mas que não conseguiu avançar no seu entendimento, pedindo desculpa para a turma por não saber e dizendo que havia concluído sua apresentação.

O professor mencionou que Marie não tinha que pedir desculpa por nada e comentou que achou sua apresentação excelente, puxando uma salva de palmas dos outros alunos para a estudante, que reagiu com um sorriso. Foi nítido que a estudante sentiu-se encorajada pela reação do professor e dos colegas, pois quando o docente perguntou ao restante da turma se alguém tinha perguntas, Marie disse confiante “*Pode perguntar.*”. Para estimular que os outros estudantes fizessem perguntas, o professor perguntou à Marie porque ela esperaria que a curva de velocidade para as galáxias caísse com a distância. Ela usou a interação gravitacional como base para sua resposta

Porque, tipo, quanto mais próximo você tá (*sic*) de um corpo, mais veloz vai ser aquilo, porque a interação gravitacional ali é maior. Quanto mais distante você tá (*sic*) do centro, no caso aqui do Sol, a interação gravitacional é menor, então é mais devagar que ele vai girar. Aí, nesse caso, seria a mesma coisa pra (*sic*) galáxia já que o centro dela teria que ser mais rápido, né? Porque tá no centro ali, e como a interação gravitacional...ela vai diminuindo conforme vai se distanciando, ela teria que ficar mais fraca, mais devagar girando. Só que, com a matéria escura, ela se mantém a mesma. Justamente por causa dessa velocidade, como se fosse uma constante, ela ficaria constante essa velocidade.

(Fonte: Fala da estudante Marie durante a apresentação de seu seminário sobre matéria escura na décima e última aula da sequência.)

Marie aproveitou também para mencionar outras informações sobre a matéria escura em sua resposta, como o fato de que ela seria capaz de explicar os efeitos de distorção da luz no fenômeno das lentes gravitacionais. Richard mencionou que perguntaria justamente sobre lentes gravitacionais e que sua dúvida já havia sido sanada. Werner perguntou se algum espectroscópio conseguiria analisar o espectro de matéria escura. Houve uma discussão sobre esses tópicos e a demonstração de excelente autonomia por parte de Marie. Os estudantes novamente aplaudiram Marie e, assim, o momento de sua apresentação finalizou.

Nos momentos seguintes, os estudantes aproveitaram para fazer perguntas sobre diversos tópicos além do Modelo Padrão. Esses momentos ocorreram como uma conversa mais informal com os estudantes, iniciados por Marie, que perguntou detalhes sobre a energia escura. Em primeiro lugar, ela tentou relacionar matéria e energia escura com uma possível existência de outras dimensões. No entanto, acabou dando outro rumo a sua

pergunta quando comentou ter lido que a matéria escura ajuda a desacelerar a expansão do Universo, ao passo que a energia escura ajudaria na expansão. Ela pediu que fosse dada alguma explicação sobre isso. Com autonomia, o estudante Werner comentou que a energia escura tem pressão negativa e o esperado é que o Universo desacelere porque ele está esfriando, ao mesmo tempo em que as cargas se neutralizam. Assim, ele disse, a gravidade passaria a ser mais relevante para “(...) *tentar reunir tudo de volta*.” O professor comentou que, como as observações mostram o contrário, ou seja, que o Universo está se expandindo aceleradamente, a energia escura deveria ser então responsável pela maioria do conteúdo do Universo devido à atuação como pressão negativa, que foi mencionada por Werner. E, como sabemos que a matéria escura interage principalmente pela interação gravitacional, ela funcionaria no sentido oposto, ajudando na desaceleração dessa expansão e em uma eventual contração.

Em seguida, Marie perguntou sobre áxions e dimensões extras, e o professor relacionou os dois com a Teoria de Cordas, comentando que nela a existência das dimensões extras era necessária para a consistência da teoria e que ela também proporciona candidatos à matéria escura, como os áxions. Werner perguntou se um buraco negro poderia ser considerado matéria escura e o professor respondeu que somente na forma de buracos negros primordiais, gerados no início do Universo, mas que eles não poderiam constituir a totalidade da densidade de matéria escura. Werner concluiu, surpreso, que “*São vários tipos de matéria escura...*”, ao que o professor comentou que essa questão ainda estava aberta na comunidade científica.

No momento seguinte, Marie perguntou “*O que seria essa supersimetria?*”. Antes de iniciar uma conversa sobre o tema, o professor garantiu que os estudantes relembassem, primeiramente, sobre orbitais da Química, para depois explorar o conceito de spin e, somente assim, introduzir conceitos básicos da supersimetria. Dessa forma, eles criaram juntos relações entre conceitos já conhecidos e os novos. Os estudantes comentaram o que lembravam sobre orbitais e o professor lembrou o preenchimento deles por elétrons. Ele provocou para uma reflexão sobre a razão de todos os elétrons não acabarem se posicionando na camada mais próxima ao núcleo uma vez que é mais favorável energeticamente. Os estudantes sugeriram que a repulsão entre os elétrons não permitia a ocupação na mesma camada e o professor aproveitou para aprimorar a sugestão dos alunos, introduzindo o conceito de spin. Para isso ele incentivou a exploração da distribuição de probabilidade de encontrar elétrons ao redor do núcleo e o princípio da exclusão de Pauli, comentando que este último diferencia o que é matéria, os chamados férmions (com spin semi-inteiro), do que não é matéria, os chamados bósons (com spin inteiro). Quando o professor comentou que (Enrico) Fermi foi homenageado na adoção do nome férmion e que ele também havia participado do desenvolvimento da bomba atômica no projeto *Manhattan*, os estudantes reagiram com perplexidade e tristeza. Depois da introdução dos conceitos de bósons e férmions, o professor lembrou as partículas do Modelo Padrão nesses termos e introduziu

a supersimetria como uma simetria relacionando bósons e férmions, o que duplica o conteúdo do Modelo Padrão.

Os estudantes se divertiram com os nomes das partículas supersimétricas, como o fotino, o wino, o zino e o gravitino. O professor comentou que tal simetria deve ser aproximada já que até hoje não observamos as partículas supersimétricas com mesma massa das partículas usuais do Modelo Padrão. O professor comentou também que a supersimetria fornece vários candidatos à matéria escura mas, no entanto, partículas supersimétrica ainda não haviam sido encontradas no LHC. Werner perguntou se os cientistas já estão construindo um novo acelerador de partículas para tentar encontrar essas partículas e o docente mencionou que existiam planos, mas nada ainda muito concreto, relatando como já é extremamente complicado montar somente a estrutura para abrigar o acelerador e que muitos cogitam a possibilidade de já usar a própria estrutura montada no CERN, onde encontra-se o LHC, apenas substituindo o aparato.

A última pergunta dos estudantes foi relacionada à teoria de Cordas, cujos principais conceitos foram apresentados e discutidos. Por exemplo, foram introduzidas como as vibrações de uma única entidade, uma pequena corda quântica do comprimento de Planck, seriam responsáveis por todas as outras partículas já discutidas em sala. Também discutiu-se a resolução para o problema da gravitação ser tão mais fraca do que as outras interações dentro do contexto de cordas e a questão sobre a matéria escura ter relação com dimensões extras, inicialmente suscitada logo após a apresentação de Marie.

O momento seguinte da aula serviu para que os estudantes dessem um *feedback* sobre a sequência de aulas, sobre o qual comentaremos em detalhes na seção 3.2. Por fim, ocorreu um panorama sobre as aulas e a apresentação da importância do Cálculo Diferencial e Integral para a Física, com uma breve discussão sobre algumas de suas noções básicas. O professor optou por incluir esse momento para comentar como diversas expressões utilizadas ao longo da sequência, cujas formas foram questionados pelos alunos, teriam explicações a partir do aprendizado desse formalismo. Albert, por exemplo, quando discutiam a energia cinética do elétron liberado no decaimento beta na aula 8 perguntou o porquê de sua expressão ser  $mv^2/2$ . O professor apresentou a intuição por trás das derivadas e integrais, comentando como poderiam ajudar na obtenção dessa expressão. Ela não foi obtida durante o momento, pois o intuito não era, obviamente, discutir regras de diferenciação e integração, mas apenas estimular os alunos para o fato de que, além da fenomenologia física, existe um formalismo matemático que auxilia na obtenção de expressões da Física. Ou seja, o docente quis enfatizar que as expressões não são fórmulas prontas e mágicas a serem apenas decoradas, mas há todo um desenvolvimento e uma linguagem matemática que nos ajudam a expressar, em forma compacta, os fenômenos físicos, as relações entre eles, permitindo que avancemos no entendimento do mundo que nos cerca.

A décima e última aula da sequência terminou sob aplausos dos estudantes, que agradeceram o professor pelas aulas. No total houve 194 intervenções, a aula com maior participação dos alunos. Cabe ressaltar que não consideramos neste total as falas de Marie durante sua apresentação, mas apenas suas falas em momentos posteriores ao de sua apresentação. Já as intervenções de todos os outros alunos foram contabilizadas desde o início da aula. Dessa forma, a média de intervenções foi de 48,5 por aluno, enquanto as médias por momento e sub-momento foram, respectivamente, 16,2 e 10,8. Marie foi a estudante mais participativa, com 89 intervenções em 14 sub-momentos, número recorde na sequência mesmo desconsiderando as falas da aluna durante sua apresentação. Em seguida, Werner e Albert participaram com 50 e 47 intervenções, em 15 e 11 sub-momentos, respectivamente. Já Richard foi quem menos participou da aula, com apenas 8 intervenções em 6 sub-momentos. Isto é compreendido uma vez que ele esteve presente apenas nas aulas 3, 9 e 10. Portanto, sua ausência na maioria das aulas possivelmente dificultou seu entrosamento durante a aula.

Os indicadores de alfabetização científica mais frequentes na última aula foram: seriação de informações (**AC-IIA**), organização de informações (**AC-IIB**), raciocínio lógico (**AC-IAA**) e teste de hipóteses (**AC-IBB**). O primeiro e o segundo ocorreram mais durante o seminário de Marie e a discussão sobre spin e supersimetria. O primeiro apareceu também durante o momento sobre energia escura, enquanto o segundo também ocorreu durante o momento sobre a teoria de cordas e na discussão final sobre o Cálculo na Física. O raciocínio lógico apareceu em diversos momentos da aula, ao passo que o teste de hipóteses foi mais frequente no momento sobre buracos negros primordiais e o da discussão sobre o spin e a supersimetria.

As operações epistemológicas que mais apareceram durante a aula foram: dedução (**AC-II2**), apelo à analogia (**AC-II6A**), consistência com outro conhecimento (**AC-II7A**) e plausibilidade (**AC-II8**). A dedução apareceu durante o momento sobre energia escura, bem como no momento sobre spin e a supersimetria. O apelo à analogia apareceu em diversos momentos da aula. Já a consistência com outro conhecimento foi mais evidente no momento sobre a energia escura, quando Werner trouxe informações relevantes sobre as características da energia escura a partir de outras fontes de conhecimento. A plausibilidade também apareceu quando se discutiu energia escura e também spin e supersimetria. Além disso, apareceu no momento sobre teoria de cordas e no último, sobre o uso do Cálculo na Física.

As operações de argumento mais frequentes foram dados (**AC-III1**), conclusão (**AC-III2**) e garantias (**AC-III3**), que apareceram entre 12 a 24 vezes. No entanto, apoios (**AC-III4**), qualificadores (**AC-III5**) e refutadores (**AC-III6**) também apareceram, com maior frequência em toda a sequência nessa última aula, de 3 a 4 vezes cada. A maior incidência foi de argumentação nos níveis 0 e 1, mas ocorreram 4 incidências do nível 2, 4 no nível 3 e 1 no nível 4.

### 3.1.5 Alfabetização científica

Os indicadores de alfabetização científica que mais apareceram em cada uma das aulas já foram discriminados na análise individual de cada uma delas acima, bem como suas caracterizações pelas operações epistemológicas. No entanto, discussões gerais sobre as similaridades e modificações observadas nas incidências desses indicadores ao longo da sequência nos revelam novas informações sobre o dinamismo das aulas. Portanto, nesta seção, elaboramos gráficos referentes a cada um dos blocos para uma melhor visualização dos resultados gerais referentes aos indicadores mais notáveis em cada um deles e fazemos considerações sobre suas incidências ao longo da sequência.

O primeiro gráfico (Fig. 3) nos fornece um panorama da incidência das ações do fazer científico do primeiro bloco de aulas, enquanto o segundo (Fig. 4) mostra quais operações epistemológicas mais caracterizaram as ações apresentadas no primeiro gráfico. Entre as ações que envolvem o trabalho com os dados obtidos em uma investigação, a mais presente foi a de seriação de informações (**AC-I1A**). Esse resultado é bastante natural tendo em vista que o bloco de aulas em questão se refere às primeiras aulas da sequência, com diversos momentos em que os alunos buscavam estabelecer as informações bases, pois ou estabeleceram seus primeiros contatos com alguns dos tópicos ou relembraram conhecimentos prévios, ressignificando-os no contexto das discussões ocorridas em sala de aula.

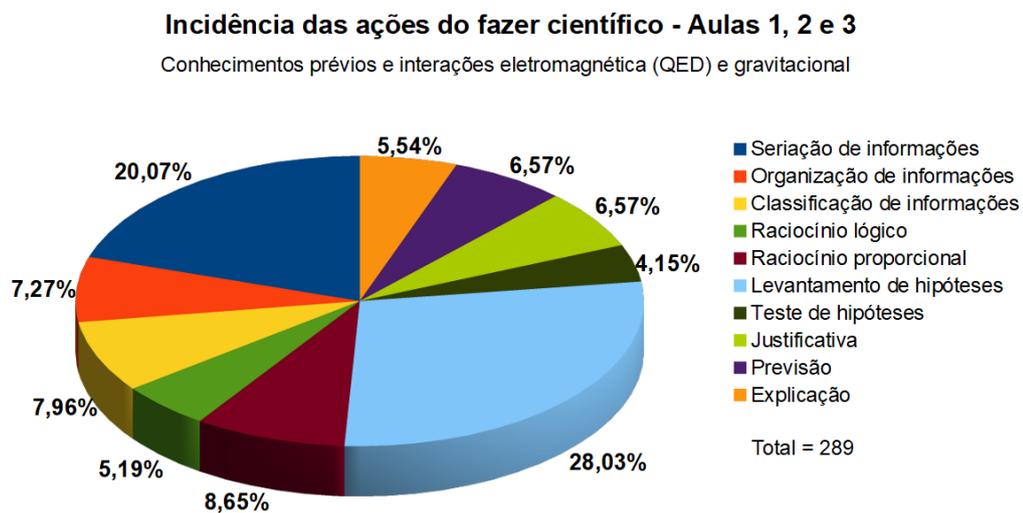


Figura 3 – Ações do fazer científico referentes ao primeiro bloco de aulas. A legenda está ordenada no sentido anti-horário do gráfico a partir de “seriação de informações” (azul escuro, 20,07%).

Com relação às ações que estruturam o pensamento científico, percebemos uma maior incidência do raciocínio proporcional (**AC-I2B**). Isso se deve principalmente ao estímulo dado para o uso do raciocínio proporcional por parte dos alunos quando uma abordagem qualitativa sustentou a discussão sobre as semelhanças e diferenças da lei de

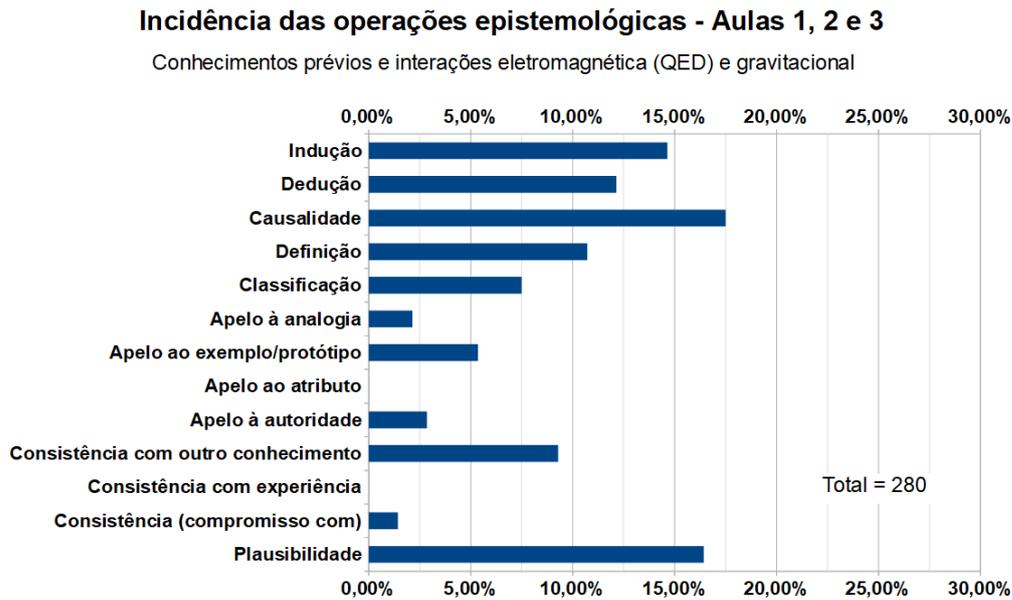


Figura 4 – Operações epistemológicas que caracterizam as ações do fazer científico do primeiro bloco de aulas.

Coulomb com a lei da Gravitação Universal de Newton na primeira aula. Também houve forte ocorrência desse indicador durante a discussão na segunda aula sobre a expressão da lei de Coulomb, quando foram analisados casos limites, como o de duas cargas elétricas colocadas muito próximas uma da outra.

Já com relação às ações que buscam o entendimento da situação analisada, a maior incidência ficou por conta do levantamento de hipóteses (**AC-I3A**), principalmente devido à primeira e à segunda aulas. Na primeira aula, esse indicador apareceu mais no momento de busca pelos conhecimentos prévios dos estudantes, quando eles ficaram à vontade para responder algumas questões-chave propostas pelo docente, com o intuito de entender o que os alunos já conheciam sobre Física de Partículas, e também para discutirem entre si, complementando as falas dos colegas com sugestões que avançavam a conversa inicial. Já na segunda aula, esse indicador apareceu com maior frequência nos momentos em que o professor estimulou os alunos a elaborarem uma lei para o magnetismo análoga à de Gauss e discutiram sobre a inexistência de monopolos magnéticos. Também houve alta incidência desse indicador no momento em que a simulação com as ondas eletromagnéticas foi utilizada, bem como no momento em que conversaram sobre o que caracterizava uma onda.

O segundo gráfico (Fig. 4) mostra a maior incidência, na ordem apresentada, das seguintes operações epistemológicas para caracterizar as ações do fazer científico presentes no primeiro bloco de aulas: causalidade (**AC-II3**, 17,50%), plausibilidade (**AC-II8**, 16,43%) e indução (**AC-III1**, 14,64%). Com relação à causalidade, compreendemos esse resultado quando notamos os momentos de sua maior incidência: na segunda aula, quando os alunos discutiam sobre as equações de Maxwell e a unificação do eletromagnetismo, durante

a simulação com ondas eletromagnéticas e também nos dois últimos momentos em que aspectos interdisciplinares foram abordados sobre a luz do Sol e seu efeito na frequência visível ao olho humano e na cor verde das plantas. Todos esses momentos convidaram os estudantes a explorar relações causais, seja buscando entendimento sobre o conceito unificado de campo eletromagnético a partir dos conceitos de campo elétrico e magnético e com a simulação de ondas eletromagnéticas que enfatizou essa relação entre os campos, ou estimulando que os alunos refletissem sobre ser uma coincidência ou não os fatos de que a frequência visível ao olho humano e a cor verde refletida pelas plantas se situam justamente na faixa de maior emitância solar. Já a plausibilidade ocorreu com maior incidência na segunda e na terceira aulas. Na segunda aula, ela apareceu mais nos momentos em que os estudantes avaliavam as sugestões de seus colegas sobre uma lei para o magnetismo análoga a de Gauss e sobre as características gerais de ondas. Já na terceira aula, ela apareceu em diversos momentos, sem que possamos destacar alguns deles. A indução, por sua vez, apareceu praticamente com a mesma incidência em todas as três aulas do bloco. Os momentos de cada uma das aulas em que ela mais apareceu foram: quando se discutiu a eletrólise da água e durante a atividade sobre reações químicas na primeira aula, quando se discutiu a inexistência de monopolos magnéticos na segunda aula e, por fim, quando se discutiu o que são partículas e ondas na terceira aula.

O terceiro gráfico (Fig. 5) fornece um panorama da incidência das ações do fazer científico no contexto do segundo bloco de aulas, sobre Física Nuclear. O quarto gráfico (Fig. 6) nos revela as caracterizações dessas ações em termos das operações epistemológicas.

Entre as ações que envolvem o trabalho com os dados obtidos em uma investigação, houve uma incidência similar de todos os três indicadores: seriação de informações (**AC-I1A**), organização de informações (**AC-I1B**) e classificação de informações (**AC-I1C**). No entanto, quando comparado ao resultado do primeiro bloco de aulas, percebemos um crescimento na incidência do segundo e do terceiro indicadores. De fato, suas incidências, no mínimo, dobraram com relação às do primeiro bloco de aulas. Esse resultado é natural pois, à medida que os alunos são expostos a novos conhecimentos, há uma maior necessidade de arranjá-los em suas estruturas cognitivas, estabelecendo relações entre eles a partir da organização e classificação dessas novas informações.

Com relação às ações que estruturam o pensamento científico percebemos uma pequena queda no raciocínio proporcional (**AC-I2B**) quando comparado ao resultado do primeiro bloco de aulas. Ainda que essa ação tenha sido estimulada nos alunos quando discutiu-se o conceito de seção de choque na quarta aula, sua incidência foi menor do que a do primeiro bloco, pois neste foram discutidas semelhanças e diferenças entre as leis de Coulomb e a da Gravitação e a obtenção qualitativa das equações de Maxwell, que estimularam ainda mais esse indicador. Portanto, nesse bloco de aulas, o raciocínio lógico (**AC-I2A**) acabou superando o raciocínio proporcional na estruturação do pensa-

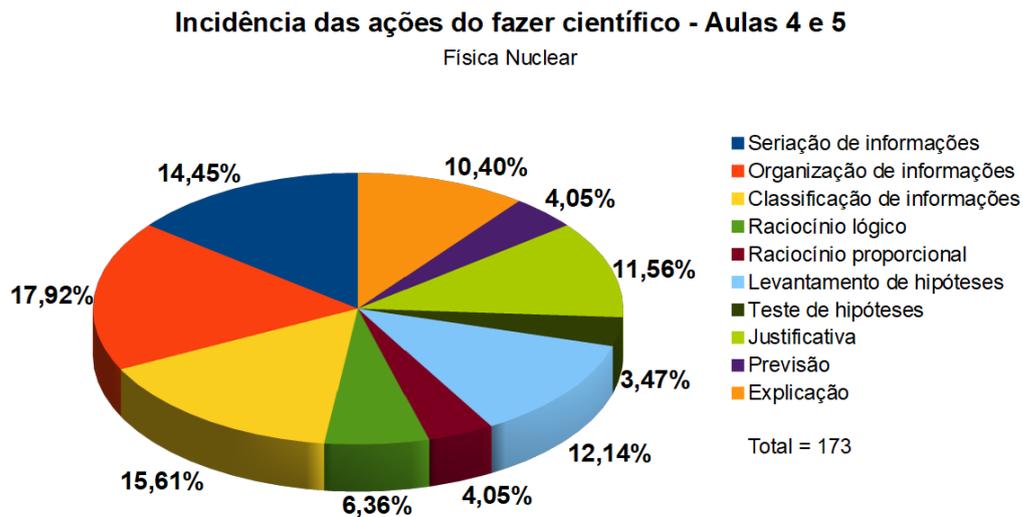


Figura 5 – Ações do fazer científico referentes ao segundo bloco de aulas. A legenda está ordenada no sentido anti-horário do gráfico a partir de “seriação de informações” (azul escuro, 14,45%).

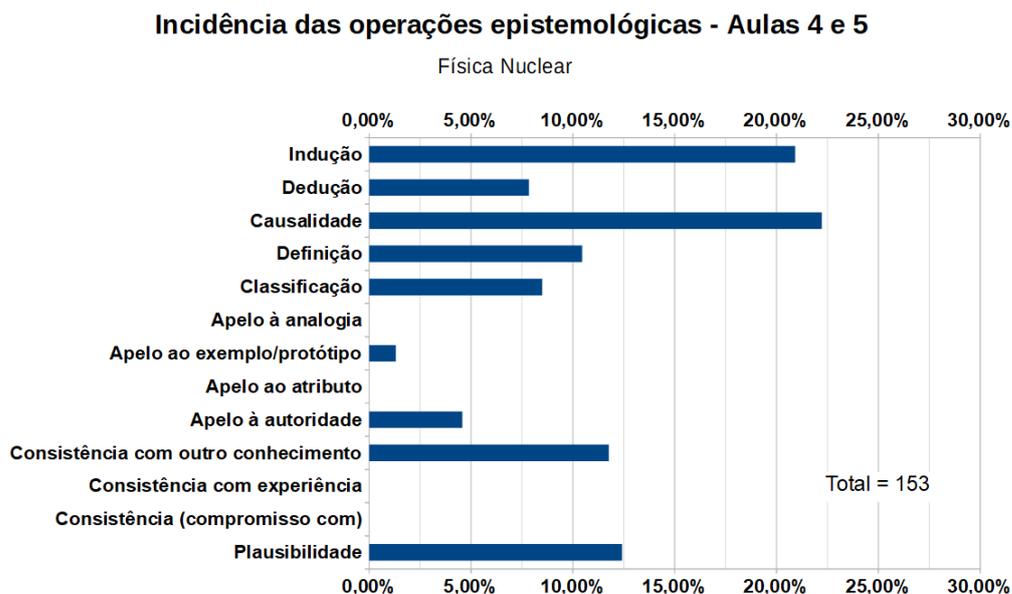


Figura 6 – Operações epistemológicas que caracterizam as ações do fazer científico do segundo bloco de aulas.

mentos dos alunos, que relacionaram mais as formas das ideias do que as ideias e variáveis propriamente ditas.

Já com relação às ações que buscam o entendimento da situação analisada, percebemos uma redução do levantamento de hipóteses (**AC-I3A**) e um aumento de quase 100% na incidência dos indicadores de justificativa (**AC-I3C**) e de explicação (**AC-I3E**). Acreditamos que houve um menor levantamento de hipóteses nesse bloco por conta de um aspecto mais expositivo da quarta aula, onde conceitos mais abstratos da Física de Partículas foram introduzidos e, portanto, os alunos não foram muito estimulados a fazer

suposições sobre situações diversas. Já na quinta aula ocorreu um maior levantamento de hipóteses mas sem compensar a baixa frequência desse indicador na quarta aula. Já os outros dois indicadores, justificativa e explicação, foram bem relevantes para os alunos durante a quinta aula. O primeiro porque os estudantes foram estimulados a incorporar ideias o tempo todo durante as discussões em sala, fortalecendo com argumentação aspectos abordados. Já a explicação reuniu vários elementos trazidos pelos estudantes, novas informações que conheciam de outras fontes, ideias sobre o uso da energia nuclear, hipóteses e previsões sobre decaimentos, radioatividade, usinas nucleares e lixo radioativo. Percebemos que esse indicador contempla uma união de ações do fazer científico e, certamente, não foi mera coincidência a sua maior incidência ter ocorrido justamente na aula que mais engajou os estudantes até o presente momento da sequência, a quinta aula. Ressaltamos como o caráter de maior abrangência sobre discussões pertinente ao mundo parece favorecer mais a união de ações do fazer científico.

O quarto gráfico (Fig. 6) mostra a maior incidência, na ordem apresentada, das seguintes operações epistemológicas para caracterizar as ações do fazer científico presentes no segundo bloco de aulas: causalidade (**AC-II3**, 22,22%), indução (**AC-II1**, 20,92%), plausibilidade (**AC-II8**, 12,42%) e consistência com outro conhecimento (**AC-II7A**, 11,76%). As três primeiras operações foram as mais relevantes também no primeiro bloco de aulas. A aula responsável pela maior incidência das três primeiras operações foi a quinta aula. Os momentos em que a operação de causalidade mais apareceu foram durante as discussões gerais sobre decaimentos nucleares, quando os estudantes tentavam entender a relação entre a radioatividade dos átomos, suas cargas e raios. Também durante as discussões sobre a bomba de Hiroshima, quando Albert usou a formação das ondas de convecção de calor para explicar a forma de cogumelo das explosões. Já a indução apareceu com mais frequência durante o momento sobre o decaimento alfa e também durante as discussões sobre a bomba de Hiroshima, especificamente quando os estudantes conversavam sobre os mecanismos de ativação das bombas. A plausibilidade foi mais presente durante as discussões sobre Chernobyl e novamente sobre a bomba de Hiroshima, bem como durante as discussões acerca das vantagens da energia nuclear e questões políticas sobre o enriquecimento de urânio. Todas elas estimularam que os estudantes avaliassem seus conhecimentos sobre os assuntos e o de seus colegas. Já a consistência com outro conhecimento esteve presente em ambas as aulas desse bloco, com maior incidência na quinta aula. Ela ocorreu com maior frequência durante o momento de discussão sobre Chernobyl, quando os estudantes trouxeram informações de outras fontes sobre o tempo de permanência máximo na região e a distância máxima permitida até a usina onde ocorreu o acidente, e também durante as discussões sobre o lixo radioativo, em que o estudante Werner trouxe diversas informações sobre o plutônio na missão *Horizon*.

O quinto gráfico (Fig. 7) fornece um panorama da incidência das ações do fazer científico no bloco de aulas sobre a interação forte e a Cromodinâmica Quântica (QCD),

enquanto o sexto gráfico (Fig. 8) mostra as caracterizações dessas ações.

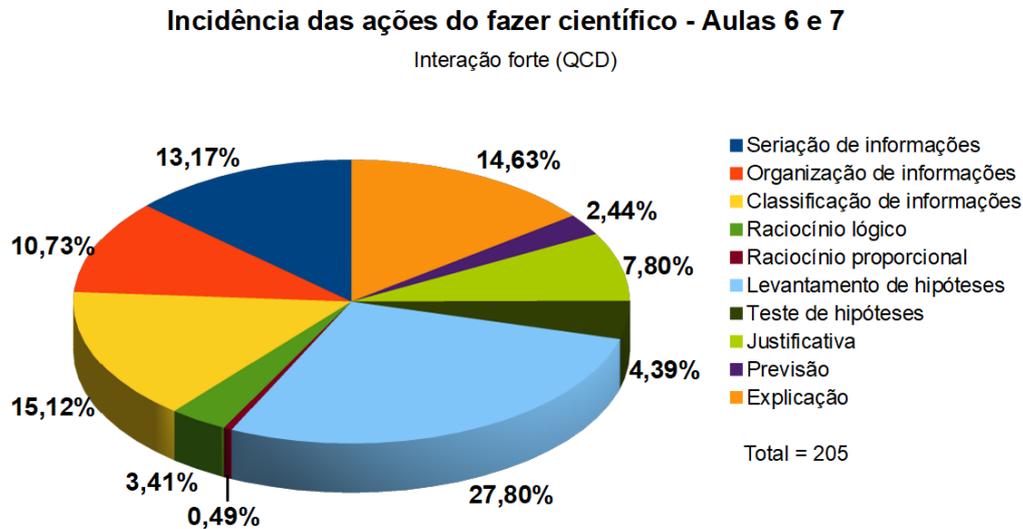


Figura 7 – Ações do fazer científico referentes ao terceiro bloco de aulas. A legenda está ordenada no sentido anti-horário do gráfico a partir de “seriação de informações” (azul escuro, 13,17%).

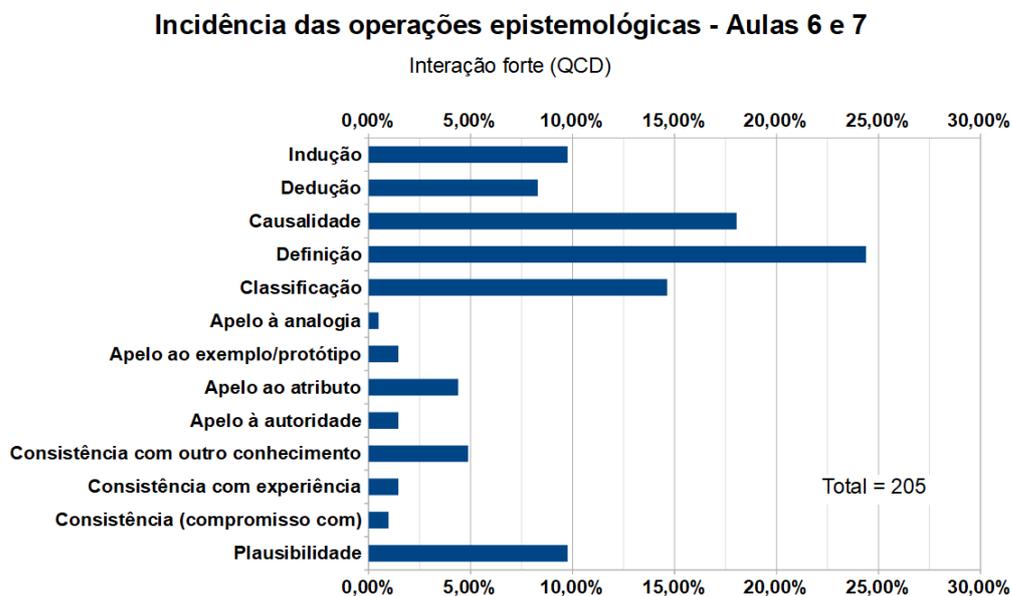


Figura 8 – Operações epistemológicas que caracterizam as ações do fazer científico do terceiro bloco de aulas.

Primeiramente, novamente notamos um equilíbrio nas incidências das 3 primeiras ações, que trabalham com os dados obtidos em uma investigação, o que é justificado pelo mesmo motivo do segundo bloco de aulas: são temáticas novas que estimulam tanto o estabelecimento das bases desses conhecimentos, quanto seus arranjos e classificações nas estruturas cognitivas dos alunos. Em segundo lugar, percebemos um aumento significativo no levantamento de hipóteses (AC-I3A) e explicação (AC-I3E) por parte dos alunos.

Acreditamos que esse resultado está diretamente relacionado ao fato de que o terceiro bloco da sequência foi o único com atividades em todas as aulas. Foram 3 atividades no total. Duas delas envolveram interpretação de gráficos no final da sexta aula e a terceira atividade envolveu uma discussão sobre ordens de grandeza na sétima aula. Essas atividades contemplaram tanto o estabelecimento de um conjunto de dados, o arranjo de informações e a investigação de relações entre elas. Também foram estimuladas a autonomia dos alunos para propor suposições sobre as ideias em discussão, bem como para usar relações entre as informações, ideias, hipóteses e previsões abordadas. Dessa forma, compreendemos a maior incidência dos indicadores destacados acima uma vez que se relacionam a todas as características envolvidas durante as atividades.

O sexto gráfico (Fig. 8) mostra a maior incidência, na ordem apresentada, das operações definição (**AC-II4**, 24,39%), causalidade (**AC-II3**, 18,05%) e classificação (**AC-II5**, 14,63%). Novamente, essas incidências refletem os momentos das atividades em sala de aula nas duas aulas do bloco, quando os alunos tiveram que agrupar os dados com critérios e estabelecer relações de causa-efeito entre eles para levantar hipóteses e realizar previsões, até demonstrarem entendimento dos conceitos trabalhados nas atividades.

Por fim, apresentamos os gráficos referentes ao último bloco de aulas, sobre a interação fraca, o bóson de Higgs e tópicos além do Modelo Padrão da Física de Partículas.

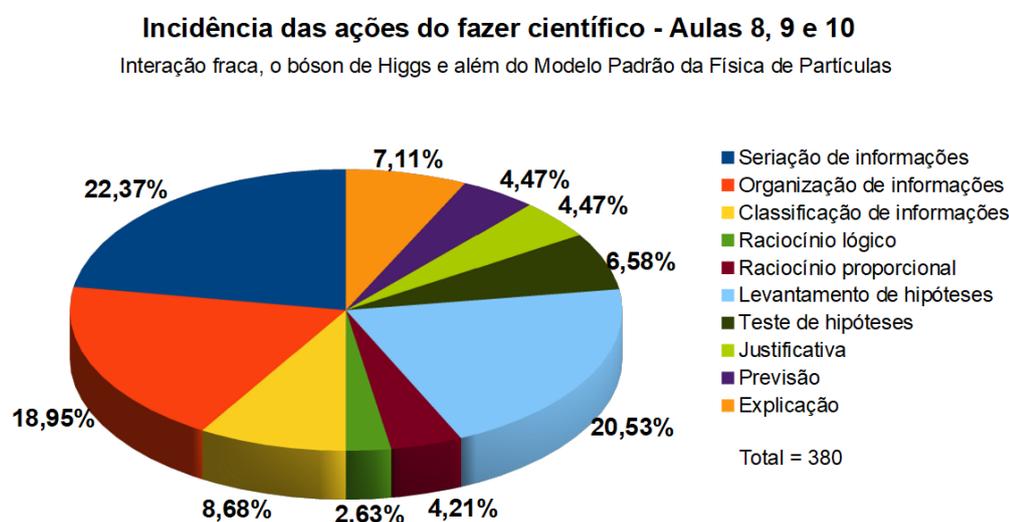


Figura 9 – Ações do fazer científico referentes ao quarto bloco de aulas. A legenda está ordenada no sentido anti-horário do gráfico a partir de “seriação de informações” (azul escuro, 22,37%).

No primeiro deles (Fig. 9), percebemos as maiores incidências em toda a sequência dos indicadores seriação de informações (**AC-I1A**, 22,37%) e organização de informações (**AC-I1B**, 18,95%). Esse resultado reflete a novidade de vários tópicos abordados nesse bloco de aulas, pois os estudantes precisaram estabelecer as bases por trás das novas informações e arranjá-las de modo a fazer sentido em suas estruturas cognitivas. Esses

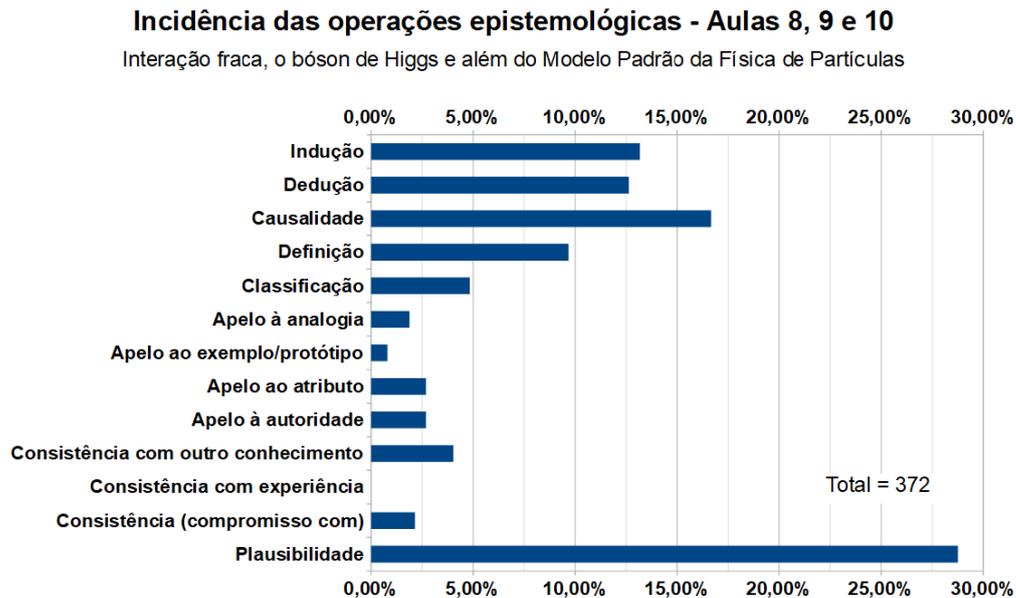


Figura 10 – Operações epistemológicas que caracterizam as ações do fazer científico do quarto bloco de aulas.

indicadores também foram bastante relevantes no segundo e terceiro blocos de aulas. Aqui, acreditamos que eles foram ainda mais relevantes, pois o bloco lidou com tópicos ainda mais atuais da Física de Partículas quando comparado aos tópicos do segundo e terceiro blocos. Isso corrobora como trazer tópicos mais contemporâneos, sobre assuntos e novas descobertas que os estudantes veem aparecer nos jornais, nas revistas e na internet, estimula a curiosidade dos estudantes, além de apresentar a Ciência como em pleno desenvolvimento.

Com relação às ações que estruturam o pensamento, houve um equilíbrio nos raciocínio lógico e proporcional. Merecem destaques algumas ações que buscam o entendimento da situação analisada, como o levantamento de hipóteses (**AC-I3A**, 20,53%) e o teste de hipóteses (**AC-I3B**, 6,58%), este último com sua maior incidência em toda a sequência. Isso se deve a dois momentos onde tais testes foram relevantes: o primeiro deles durante a oitava aula quando a importância das unidades de medida foi trabalhada, bem como na décima aula quando os alunos avaliaram suas hipóteses sobre buracos negros primordiais, spin e supersimetria.

O último gráfico da seção (Fig. 10) mostra a maior incidência de uma única operação epistemológica ao longo de toda a sequência, a operação de plausibilidade (**AC-II8**, 28,76%). Causalidade (**AC-II3**, 16,67%), indução (**AC-II1**, 13,17%) e dedução (**AC-II2**, 12,63%) também aparecem como as mais frequentes. Elas foram recorrentes principalmente durante as aulas 8 e 10. Os momentos da aula 8 responsáveis por essas operações foram: durante as discussões sobre a importância das unidades de medida e a troca de  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z$ , bem como durante a atividade sobre os diagramas de Feynman e a discussão das características da interação fraca. Já na aula 10 essas operações apareceram

no momento sobre energia escura e na discussão sobre spin e supersimetria.

### 3.1.6 Engajamento

#### Engajamento comportamental

Na análise individual de cada uma das aulas comentamos sobre a participação dos alunos em cada uma delas, contabilizando o número total de intervenções, por momento e sub-momento, e também por aluno. Esses dados se referem à participação dos alunos nas aulas (**E-I1**), um dos indicadores do primeiro tipo de engajamento considerado, o engajamento comportamental. A tabela 18 resume esses dados.

Aula	Duração (minutos)	Total	Nº de alunos	Média por aluno	Nº de momentos/sub-momentos	Média por momento/sub-momento
1	55	101	10	10,1	16/26	6,3/3,9
2	65	151	8	18,9	16/23	9,4/6,6
3	65	122	7	17,4	17/31	7,2/3,9
4	52	70	6	11,7	10/16	7,0/4,4
5	65	141	5	28,2	16/28	8,8/5,0
6	70	181	6	30,2	11/20	16,5/9,1
7	72	137	5	27,4	15/19	9,1/7,2
8	48	197	6	32,8	11/20	17,9/9,9
9	65	92	6	15,3	12/15	7,6/6,1
10	65	194	4	48,5	12/18	16,2/10,8

Tabela 18 – A duração das aulas da sequência em minutos, o total de intervenções dos alunos em cada uma delas, o número de alunos e a média de intervenções por aluno. As duas últimas colunas apresentam os números de momentos/sub-momentos e a média de intervenções por momento/sub-momento, respectivamente.

Os dois últimos blocos contaram com o maior número de intervenções por aula. Os destaques ficam por conta das aulas 6, 8 e 10, com as maiores médias de intervenções por aluno, e por momento/sub-momento. A oitava aula, em particular, apesar de ter uma menor duração entre todas as aulas da sequência, alcançou o maior número de intervenções. Cabe lembrar que o decaimento beta, neutrinos e a interação fraca foram os principais tópicos dessa aula. Também houve uma atividade com os diagramas de Feynman para a interação fraca, com ótima participação dos estudantes. A maior média por aluno ocorreu na última aula da sequência. Acreditamos que esse resultado demonstra o fruto de uma aula mais informal em que, apesar de contar com a apresentação de um seminário por Marie, os alunos puderam também selecionar tópicos mais atuais de interesse relacionados à Física de Partículas para serem discutidos em sala e sistematizados pelo professor. Essa aula também contou com as maiores médias por momento/sub-momento, tais como a aula 6 que, apesar de introduzir conceitos mais abstratos, como o de seção de choque entre partículas, teve uma sequência de tópicos muito bem relacionados, culminando nas duas atividades com maior participação dos alunos em toda a sequência: a atividade simulando

uma questão do ENEM e outra com uma questão da FUVEST, para instigar o estudo da linguagem gráfica nos alunos. A quinta aula também aparece em destaque com a quarta maior média de intervenções por aluno. Lembramos que ela lidou com questões políticas, éticas, morais e ambientais relacionadas à energia nuclear.

Mencionamos na análise específica da segunda aula que, apesar de poucas interações na primeira aula da sequência, os alunos lembraram os tópicos discutidos nela logo no início da segunda aula. Dessa forma, acreditamos ser este um indício de que um maior engajamento cognitivo não exige necessariamente um alto grau de engajamento comportamental. Cabe ressaltar que não queremos dizer que o engajamento comportamental não favorece o processo de ensino-aprendizagem, mas que ele não parece ser necessário para gerar engajamento cognitivo dos alunos, pelo menos enquanto consideramos apenas a participação dos estudantes nas discussões em aulas específicas como o indicador principal de engajamento comportamental. Esse resultado dialoga com o estudo de [COELHO; AMANTES \[2014\]](#), que avaliou o engajamento comportamental e cognitivo de 152 alunos da 3ª série do ensino médio de uma instituição federal, expostos a uma sequência didática sobre eletricidade e com o uso de modelagem Rasch para análise de dados dicotômicos. Um dos resultados desse estudo foi o de que não houve diferença na taxa evolutiva do entendimento para os sujeitos de alto e baixo engajamento comportamental.

Apresentamos o gráfico (Fig. 11) com a evolução do indicador de participação nas aulas para os cinco alunos mais presentes durante toda a sequência. Dados referentes a alunos que estiveram presentes apenas em uma, duas ou três aulas, não parecer ser capazes de fornecer subsídios consistentes, ainda mais quando suas presenças ocorreram com espaçamento entre as aulas. Portanto, optamos por uma amostragem com apenas os cinco alunos que estiveram presentes em mais da metade das aulas, avaliando que dessa forma tenhamos resultados mais representativos. Os alunos considerados foram Werner, Albert, Marie, Peter e Emmy, que estiveram presentes em 10, 10, 8, 7 e 6 das 10 aulas da sequência, respectivamente. Percebemos que Werner, Albert e Marie foram os estudantes com maior participação durante a sequência. Enquanto a participação de Werner foi constante ao longo de todas as aulas, percebemos um aumento na participação de Albert e Marie. Albert passou a participar mais a partir da quinta aula, quando aspectos políticos, éticos, morais e ambientais sobre a Física Nuclear foram abordados. Já Marie deu um salto de participação logo na segunda aula. Ela não esteve presente na quinta e na sétima aulas, mas quando retornou na oitava aula, percebemos outro salto significativo em sua participação, atingindo o número máximo de participações de um mesmo aluno durante a última aula, com 84 intervenções, desconsiderando as falas relacionadas à apresentação de seu seminário.

Os dois alunos com menor participação entre os cinco foram Peter e Emmy. Peter participou bem das três primeiras aulas e, apesar de não estar presente na quarta e quinta aulas, quando ele retornou para a sexta aula e a sétima aulas também exibiu um bom

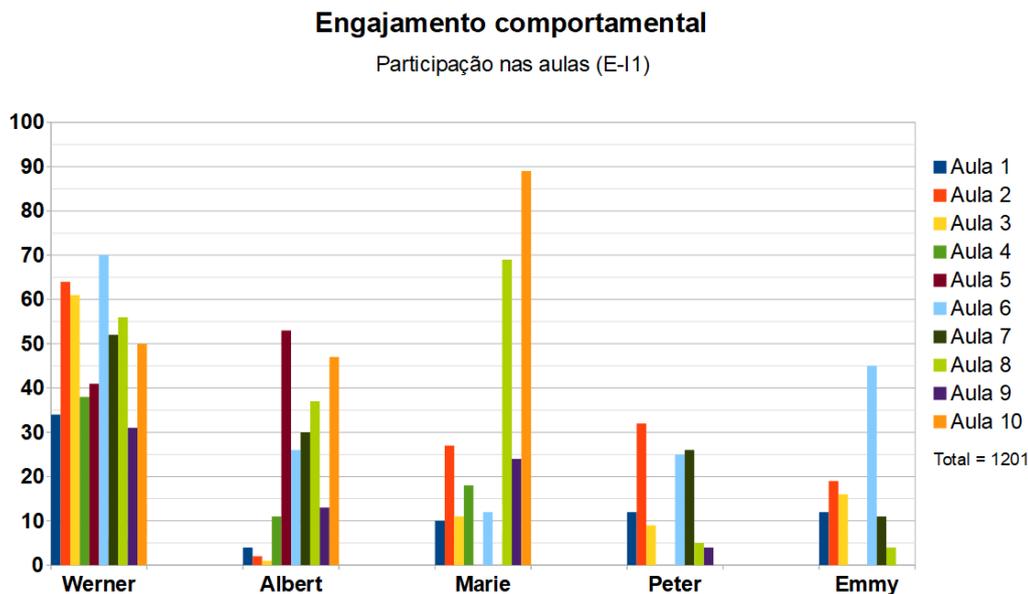


Figura 11 – Evolução do número de intervenções que manifestaram o primeiro indicador de engajamento comportamental (participação nas aulas, **E-I1**) dos cinco alunos com maior presença física nas aulas durante a sequência.

número de intervenções. No entanto, percebemos que ele participou pouco da oitava e nona aulas e, novamente, não esteve presente na última aula da sequência. Emmy participou bem das primeiras três aulas da sequência. No entanto, da mesma forma que Peter, Emmy não esteve presente na quarta e quinta aulas. Quando ela retornou, na sexta aula, mostrou um número maior de intervenções quando comparado ao de Peter. Entretanto, na sétima aula, a incidência de suas intervenções diminuiu, tendo participado pouco da última aula em que esteve presente, a oitava aula.

Portanto, avaliamos que Werner, Albert e Marie apresentaram um ótimo nível do indicador de engajamento comportamental referente à participação nas aulas. Werner manteve um nível ótimo constante ao longo de toda a sequência. Já Albert e Marie aumentaram suas participações ao longo da sequência. Consideramos um nível regular de engajamento comportamental para Peter e Emmy, ambos demonstrando um número considerável de participações em sala de aula em toda a sequência.

O segundo indicador de engajamento comportamental foi o de participação e execução das tarefas de sala (**E-I2**). Primeiramente relembramos as atividades para sala: leis ponderais da Química (aula 1), ondas e partículas na fenda dupla (aula 3), interpretando o gráfico da seção de choque após correção para altas energias: brincadeira simulando questão do ENEM e subestruturas dos prótons e nêutrons (aula 6), interpretando gráficos e o levantamento de hipóteses na Ciência com uma questão da FUVEST (aula 6), pensando sobre ordens de grandeza (aula 7), encontrando as cargas elétricas a partir de diagramas de Feynman para a interação fraca (aula 8), apresentação de seminário (aula 10).

Nas duas primeiras atividades houve participação de Werner, Marie, Peter e Emmy.

Nas duas atividades da sexta aula, apenas Marie não participou. A não participação de Marie se deu porque ela deixou a sala com 30 minutos de aula e, assim, não esteve presente nos últimos momentos da aula quando ocorreram as atividades. Na atividade da sétima aula, Werner, Albert, Peter e Emmy participaram. Novamente, Marie não participou, pois não esteve presente nessa aula. Já na atividade da oitava aula, somente Werner e Marie participaram, além de participação também forte da aluna Chien que, no entanto, não é considerada na análise de engajamento por não estar presente na maioria das aulas. Já Marie foi a única a elaborar um seminário para apresentar na última aula. Como não podemos avaliar qualquer participação nas aulas em que Marie não esteve presente e ela participou bem em todas as atividades das outras aulas, consideramos Werner e Marie com um ótimo nível de engajamento comportamental por participação e execução das tarefas de sala. Com relação a Albert, Peter e Emmy, consideramos um nível regular desse indicador, pois eles não participaram da tarefa da oitava aula e não prepararam um seminário para a última aula. Peter e Emmy não participaram da tarefa na oitava aula pois deixaram a sala um pouco antes de seu início. No entanto, ainda que ambos e também Albert e Werner não tenham preparado um seminário, enquadramos Werner em um nível acima dos três primeiros estudantes pois sua participação em termos de intervenções foi superior ao desses alunos.

Como tarefa de casa, pedimos que os alunos escrevessem uma carta ou um e-mail fictício a um(a) amigo(a), colega ou familiar, que também estivesse interessado(a) pela temática de Física de Partículas, relatando o que aprenderam até a quinta aula da sequência. O enunciado da atividade foi entregue aos alunos e encontra-se na Fig. 12.

## UNIVERSO NA ESCOLA

CEEMTI Prof. Maura Abaurre

### **O Modelo Padrão da Física de Partículas: A teoria de quase tudo**

Na primeira parte das aulas de Física de Partículas falamos bastante sobre a interação eletromagnética e a interação nuclear forte, sobre como elas estão presentes em nosso dia-a-dia, sobre algumas das partículas envolvidas nessas interações e também sobre algumas de suas aplicações práticas. Imagine que um(a) amigo(a), colega ou um(a) familiar também se interesse por essa temática, mas infelizmente não pôde comparecer a essas aulas. Escreva uma carta ou um email relatando-lhe o que você aprendeu de interessante sobre Física de Partículas até agora, explicando algumas das principais ideias apresentadas nas aulas, contando de que tópicos você mais gostou e quais assuntos você está ansioso para aprender nas aulas seguintes. Pode falar também de influências que as aulas tenham tido sobre você, se afetaram seu interesse pela Física (positiva ou negativamente), ou qualquer perspectiva pessoal que queira expôr. Lembre que quem receber sua mensagem não estará fazendo julgamentos sobre seus conhecimentos do assunto: está apenas curioso(a) para saber como foram as aulas e gostaria de aprender um pouco sobre Física de Partículas através de sua explicação. Fique livre para fazer diagramas, desenhos, ou qualquer meio que julgue conveniente para suas explicações.

Figura 12 – Enunciado da atividade para casa entregue aos alunos após a quinta aula da sequência.

Albert e Marie foram os únicos alunos que retornaram a atividade, um dia antes da nona aula da sequência. O interessante foi que ambos escreveram sobre tópicos que apareceram em todas as aulas até o momento e, inclusive, na nona aula, a mais recente. Ou seja, extrapolaram a atividade escrevendo sobre ainda mais aulas do que o pedido. Isso evidencia o engajamento desses alunos na atividade pois, se quisessem, poderiam escrever apenas sobre algumas aulas, mas optaram por comentar sobre todas elas. Portanto, consideramos os dois alunos com ótimo engajamento comportamental no indicador de participação e execução das tarefas de casa (**E-I3**), enquanto os outros alunos, que não entregaram a atividade, foram então classificados em um nível insatisfatório.

### Engajamento emocional

Os indicadores de engajamento emocional apareceram de diversas formas ao longo da sequência. A tabela 19 mostra, para os indicadores mais recorrentes durante a sequência, a evolução em suas incidências para cada um dos quatro blocos de aulas e, novamente, para os cinco alunos que mais estiveram presentes ao longo da aulas.

Incidência de engajamento emocional								
Aluno	Código Bloco	Emoção		Identificação com escola e/ou colegas		Identificação com professor	Atribuição de valores à Física e/ou às Ciências em geral	
		E-II1A	E-II1D	E-II2A	E-II2B	E-II3A	E-II4A	E-II4D
Werner	1°	11	0	1	0	1	2	0
	2°	15	2	2	0	1	0	3
	3°	16	4	4	0	1	2	0
	4°	19	0	4	1	4	2	2
Albert	1°	11	0	1	0	0	0	0
	2°	13	1	2	0	0	0	0
	3°	16	0	1	0	0	0	0
	4°	27	0	3	2	1	4	0
Marie	1°	16	0	0	0	2	2	0
	2°	13	0	1	0	0	0	2
	3°	13	0	0	0	0	0	0
	4°	49	0	2	2	3	1	0
Peter	1°	21	2	2	0	0	0	0
	2°	–	–	–	–	–	–	–
	3°	34	0	8	2	2	1	0
	4°	23	0	2	0	1	0	0
Emmy	1°	24	0	2	0	0	0	0
	2°	–	–	–	–	–	–	–
	3°	23	0	8	1	0	0	1
	4°	17	0	0	0	1	0	0

Tabela 19 – Os indicadores de engajamento emocional mais recorrentes nos cinco alunos com maior presença, em cada um dos quatro blocos de aulas da sequência. A entrada “–” significa que o(a) aluno(a) não esteve presente no bloco de aulas em questão.

O indicador **E-II1A** se refere a emoções reveladas tanto usando expressões e frases positivas quanto usando expressões positivas, mas sem verbalização de frases, ou seja, a expressão de emoções através de risos e/ou gargalhadas. Os indicadores **E-II2A**, **E-II3A** e **E-II4A** também se referem a essas caracterizações, mas lidando com situações distintas de emoções propriamente ditas. No primeiro caso, são consideradas manifestações emocionais de identificação com a escola e/ou colegas. Já no segundo caso, são consideradas manifestações emocionais de identificação com o professor. Por fim, o último indicador se refere a manifestações emocionais relacionadas à atribuição de valores à Física ou às Ciências em geral. As maiores incidências desses indicadores se relacionam diretamente à emoção que, para Werner, Albert e Marie aumentou ao longo dos blocos de aulas. Já Peter e Emmy mantiveram uma constância na manifestação desse indicador.

Os indicadores **E-II1B** e **E-II1C** não aparecem na tabela, pois cada um foi manifestado apenas uma vez no quarto bloco de aulas por Marie. Eles podem se referir tanto a expressões positivas e frases negativas quanto à expressões negativas e frases positivas. Marie se manifestou com expressão negativa e frase positiva na nona aula para se referir à sua apresentação que ocorreria na décima aula. Ela também se manifestou com expressão positiva e frase negativa no início de sua apresentação, já na décima aula, para se referir ao nervosismo que sentia com a situação. No entanto, ressaltamos que, passado esse nervosismo inicial, Marie deu uma excelente apresentação sobre matéria escura, com aplausos de toda a turma e do professor.

Com relação ao último indicador de emoção **E-II1D**, que se refere à expressão e frase negativas ou expressão negativa e frase ausente, demonstrando insatisfação ou repulsa, Peter o manifestou por duas vezes na segunda aula, por meio de expressões faciais e gestuais de cansaço seguidas de palavras como “*Ai...*”. As duas manifestações de Werner e a única manifestação de Albert desse indicador no segundo bloco de aulas ocorreram na quinta aula, durante a discussão sobre as bombas de Hiroshima e Nagasaki. Isso evidencia que trazer temáticas reais provoca os alunos a, primeiramente, estabelecerem relações de sentido sobre elas para, posteriormente, estarem aptos a fazer julgamentos mais racionalizados, como evidenciam os altos índices de engajamento cognitivo nessa aula (veremos os detalhes abaixo na discussão sobre engajamento cognitivo). Werner também manifestou esse indicador por quatro vezes durante a aula 6 quando, em todas elas, pediu desculpas e falou “*Foi mal.*” nos momentos em que o professor ou colegas complementavam alguma de suas falas. Acreditamos que ele interpretou como se o professor ou colegas o estivessem corrigindo. Como essas ocorrências foram pontuais, somente nessa aula, cogitamos a possibilidade de aspectos externos emocionalmente negativos, fora de nossos alcances, terem afetado o aluno neste dia, em particular.

Com essas ponderações, classificamos todos os estudantes em um nível ótimo de engajamento emocional a partir do indicador de emoção, contemplando os indicadores que o compõem, **E-II1A** a **E-II1D**.

No primeiro e no segundo blocos de aulas, todas as manifestações do indicador **E-II2A** foram direcionadas aos colegas. Todos os alunos que se manifestaram demonstraram proximidade, carinho, respeito e consideração por outros colegas da sala, também com sorrisos para os colegas e interações entre eles. Já nos outros blocos, as incidências do indicador **E-II2A** foram direcionadas tanto para a escola quanto para colegas. Peter e Emmy sorriram entre si e para Albert na sexta aula, comentando que se sentiam humilhados com as respostas de alto nível que Albert deu durante as atividades do final da aula. Percebemos esses comentários apenas como brincadeiras, nada com conteúdo confrontativo ou desmotivador para os colegas. Todas as demonstrações de Werner, Albert e Marie ocorreram na oitava aula da sequência, quando manifestaram descontentamento com a estrutura da escola devido ao retroprojeto não funcionar pela segunda vez durante a sequência. Apesar de expressões positivas, eles fizeram comentários negativos quando o professor perguntou se o retroprojeto estava com defeito. Eles responderam “*Cara...*”, “*É uma longa história...*”, “*Eu acho que o problema é o selo de identificação (risos).*”, “*Olha, pela regra...*”. Portanto, essas incidências correspondem ao indicador **E-II2B**.

Não houve qualquer incidência do indicador **E-II2C**. Houve duas ocorrências de identificação negativa tanto em expressão quanto em frase para com a escola **E-II2D**, partindo do estudante Werner. Todas na sétima aula, quando o estudante também demonstrou insatisfação com a qualidade do retroprojeto, que ficava embaçado constantemente. Por esses motivos e para uma melhor clareza na apresentação dos resultados optamos por não apresentar esses dados na tabela 19.

Diante dessas ponderações também consideramos que todos os alunos tiveram um nível ótimo de engajamento emocional a partir da identificação com a escola e/ou colegas, apesar das manifestações negativas quanto ao retroprojeto, mas nada tão grave que não pôde ser resolvido e adaptado para a continuidade das aulas.

Com relação aos indicadores de identificação com o professor percebemos apenas expressões e frases positivas (**E-II3A**) por todos os alunos, que apareceram ao longo de todos os blocos de aulas. Ou seja, os alunos pareceram à vontade com o professor responsável pelas aulas e confiantes sobre sua experiência, o que, certamente, proporciona um ambiente mais amigável, propício a interações significativas em sala de aula que facilitam o processo de ensino-aprendizagem. Como não houve qualquer ocorrência dos indicadores **E-II3B**, **E-II3C** ou **E-II3D**, que revelariam uma identificação intermediária ou baixa com o professor, não os apresentamos na tabela 19.

Assim, todos os estudantes se encontram no nível ótimo de identificação com a escola e/ou colegas, e também com o professor, contemplando o segundo e terceiro indicadores de engajamento emocional.

Com relação aos indicadores de atribuição de valores à Física e/ou às Ciências em geral, notamos uma maior incidência de expressões com frases positivas (**E-II4A**), o que

demonstra que os estudantes, no geral, valorizam a Ciência.

As incidências de Werner ocorreram na primeira, segunda, sexta e décima aulas. Na primeira, ele atribui o valor de confiabilidade à Ciência quando discutiram sobre a Terra plana ou redonda. Ele enfatizou como a Ciência fornece diversas evidências de que a Terra é redonda. Na segunda e na sexta aulas, ele atribui o valor de complexidade à Ciência ao comentar sobre descobertas da aplicabilidade de ondas eletromagnéticas e sobre como cientistas buscam por uma resposta sem saber o que esperam. Já na décima aula, Werner atribui o valor de consistência à Ciência, quando comenta sentir-se surpreso que expressões matemáticas para descrever os fenômenos observados realmente funcionam. Esse comentário foi feito durante o momento sobre a utilidade do Cálculo para a Física. Todas as incidências de atribuição positiva de Albert ocorreram na décima aula. Durante a discussão sobre dimensões extras, o professor mencionou como existem diversas propostas científicas para explicar a variedade de fenômenos observados. Albert então atribuiu o valor de confiabilidade na Ciência ao comentar que ele percebe como sempre alguma proposta acaba funcionando. Da mesma forma que Werner, Albert também demonstrou encanto pela consistência e funcionalidade de expressões matemáticas. Marie também atribuiu confiabilidade à Ciência durante a segunda aula, no momento sobre as evidências para a teoria da evolução de Darwin. Ela demonstrou expressão positiva e exclamou “*Aha!*”, concordando com o professor quando ele comentou que os estudantes poderiam usar as evidências discutidas em sala para argumentar com uma pessoa que se diz contrária à teoria da evolução. Ela também atribuiu valor de confiabilidade na décima aula ao comentar que, quando não sabemos alguma coisa, a investigação pela Ciência é o que nos ajuda a avançar. Já Peter demonstrou, na sexta aula, compreender a importância do levantamento de hipóteses, associando-o a um valor metodológico da Ciência.

Emmy demonstrou a única incidência de **E-II4B**, na sexta aula, no momento da atividade sobre levantamento de hipóteses com uma questão da FUVEST. Quando o professor comentou como os cientistas fazem pesquisa levantando hipóteses e as testando, comparando hipóteses a chutes com fundamentação, Emmy comentou sorrindo que, no caso da Ciência chutes são aceitos mas que o pensamento geral é de que chutes não são muito bem-vindos. Dessa forma, ela traz à tona uma reflexão importante sobre como as pessoas, no geral, desconhecem o fazer científico por não compreenderem o caráter de suposição de hipóteses, que devem ser confirmadas ou invalidadas. Ela também parece não compreender esse caráter e, assim, acaba também por conferir um valor de autoridade à Ciência quando deixa a entender que, dentro da Ciência, pode-se usar ações (os chutes) que não são bem-vistas socialmente. Cabe ressaltar que, nesse momento, o professor interveio, esclarecendo para a estudantes que as hipóteses devem e são testadas, distinguindo-as dos “achismos” da atualidade, perpetuados por grupos diversos sem quaisquer evidências e testes. Não houve qualquer incidência de expressões negativas e frases positivas (**E-II4C**). Portanto, optamos por não incluir os indicadores **E-II4B** e **E-II4C** na tabela 19.

Já Werner, Marie e Emmy demonstraram atribuição com expressões e frases negativas à Ciência (**E-II4D**). As incidências de Werner ocorreram na quarta, quinta e décima aulas. As duas incidências de Marie ocorreram na quarta aula. Na quarta aula, Werner e Marie ficaram chocados negativamente quando descobriram que César Lattes agora dava nome à maior plataforma de currículos do Brasil. Eles comentaram “*Descobriu o pión e agora é só um currículo.*” e “*O Brasil sabe valorizar as pessoas.*”. Dessa forma atribuíram um valor negativo não à Ciência em si, mas a como ela é desvalorizada no país. Portanto, consideramos essa incidência mais apropriada a esse indicador. Os alunos acreditavam que Lattes deveria receber uma homenagem maior, quando a maioria dos brasileiros sequer conhece o seu nome. Marie também demonstrou insatisfação por Lattes não ter recebido o prêmio Nobel. O professor comentou que ele participou de uma colaboração que descobriu o pión. Entretanto, Marie insistiu “*Rutherford não descobriu sozinho, mas também é outra história.*”, referindo-se ao fato de que Rutherford também participou de uma colaboração relacionada à outra descoberta, e que deveriam existir outros motivos para ele receber o Nobel enquanto o Lattes não. Dessa forma, pensamos que a aluna sentiu-se indignada com o fato de que cientistas de outras nacionalidades recebem premiações e glórias mesmo quando participam de descobertas colaborativas mas, quando um brasileiro faz o mesmo, não recebe o mesmo tratamento. Portanto, ela atribui o caráter de exclusão à Ciência, chamando a atenção para o fato de que os nomes que entram para a História da Ciência são aqueles que têm permissão. Enquanto isso, muitos outros nomes são apagados ou esquecidos, uma constatação um tanto quanto dura da realidade que, de fato, ocorreu e ocorre ao longo da História e, cabe ressaltar, não somente na área científica, mas também em diversos outros campos, como nas Humanidades e nas Artes.

Já na quinta aula, Werner comentou que “*Construir é mais difícil.*” quando o professor comentou que a bomba a partir da fusão nuclear já tinha sido descoberta, mas um método para gerar energia com esse processo ainda encontrava-se em estudo. Ele ainda comentou “*Quanta coisa que é pra (sic) ser importante pra (sic) humanidade acaba destruindo a humanidade.*”, avaliando negativamente os usos políticos da Ciência.

Na décima aula, quando o professor comentou sobre Enrico Fermi, que participou da criação da bomba atômica, ter sido homenageado com o nome férmion dado às partículas de matéria com spin semi-inteiro, Werner reagiu com uma expressão negativa de insatisfação e ofegante. Ainda exclamou “*Ensina assim...fazer o certo.*”, em clara ironia com o fato de a comunidade científica homenagear um cientista com participações em trabalhos que acabaram por acometer danos a diversos civis. Cogitamos, pelas falas e expressões do aluno, que ele sentiu receio quanto aos jogos políticos que permeiam o meio científico.

A única incidência totalmente negativa de Emmy (**E-II4D**) ocorreu na sexta aula, quando ela atribuiu um caráter de memorização a nomes científicos, como os da Biologia. Ela demonstrou irritação e exclamou “*Biologia, tá vendo?!*”, quando o professor comentou

que, ainda hoje, algumas questões em exames para ingresso no ensino superior cobram a pura memorização de nomes, citando um exemplo sobre a classificação de plantas. O professor ressaltou que, no entanto, a Ciência é uma construção coletiva interpretativa, e tais exames deveriam incorporar questões de caráter mais interpretativo para ser condizente com o fazer Ciência.

Como houve incidências tanto no espectro mais positivo quanto no seu aspecto mais negativo do indicador de atribuição de valores à Física ou às Ciências em geral, essas ponderações fizeram com que considerássemos Werner, Marie e Emmy com nível regular desse indicador de engajamento emocional. Já Albert e Peter, que não se manifestaram negativamente com relação a esse indicador, foram classificados no nível ótimo.

### Engajamento cognitivo

A evolução dos indicadores de engajamento cognitivo para os cinco alunos que mais estiveram presentes nas aulas está disposta nos gráficos (Figs. 13 a 16) a seguir.

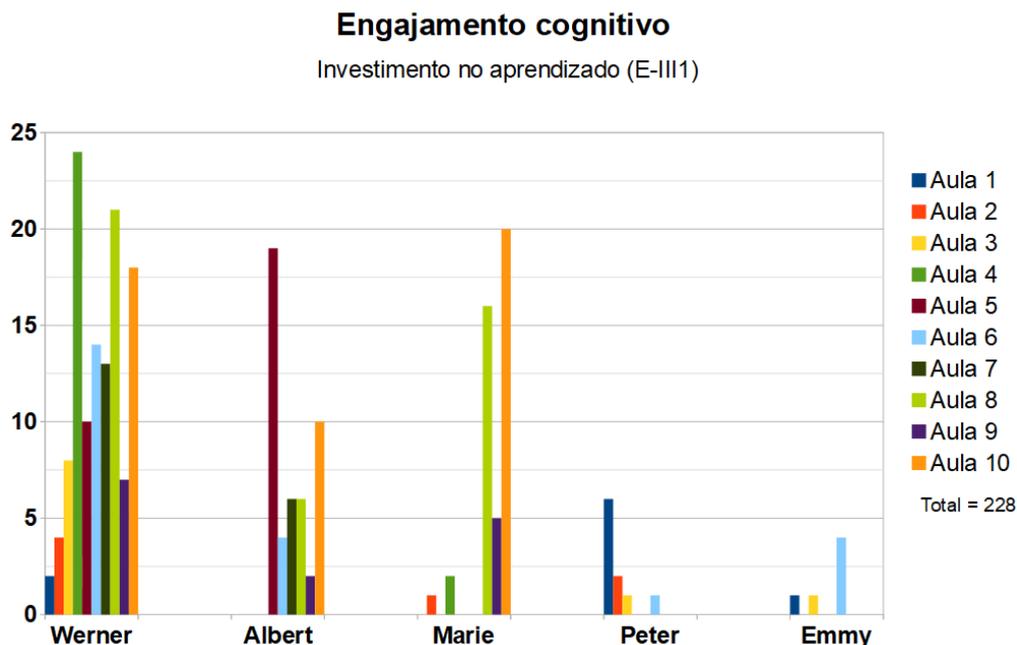


Figura 13 – Evolução do número de intervenções que manifestaram o primeiro indicador de engajamento cognitivo (investimento no aprendizado, **E-III1**) dos cinco alunos com maior presença física nas aulas durante a sequência.

Ao longo de todas as aulas Werner demonstrou todos os indicadores de engajamento cognitivo, com exceção da autonomia na nona aula da sequência, justamente a aula com um caráter mais expositivo. Enquanto seu investimento no aprendizado (**E-III1**) no geral aumentou durante as aulas, a autonomia (**E-III2**) se manteve constante ao longo delas. Com relação ao desejo de ir além do básico (**E-III3**), notamos como, para cada um dos blocos, Werner inicia a primeira aula de cada bloco com um grau perceptível e este grau aumenta ao longo das aulas do determinado bloco. Apenas no terceiro bloco o desejo é um

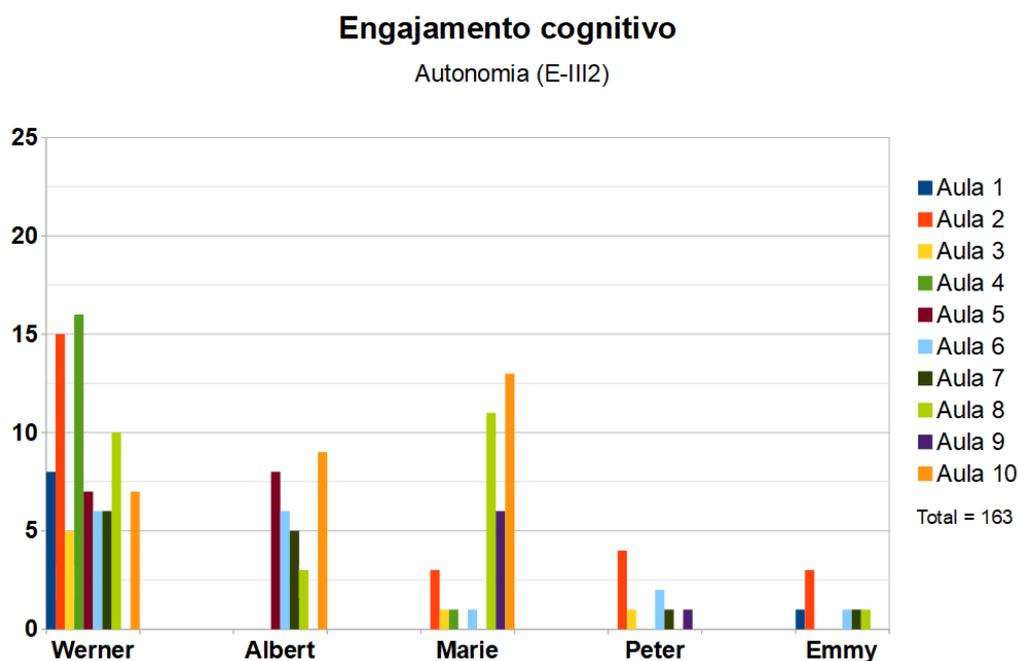


Figura 14 – Evolução do número de intervenções que manifestaram o segundo indicador de engajamento cognitivo (autonomia, **E-III2**) dos cinco alunos com maior presença física nas aulas durante a sequência.

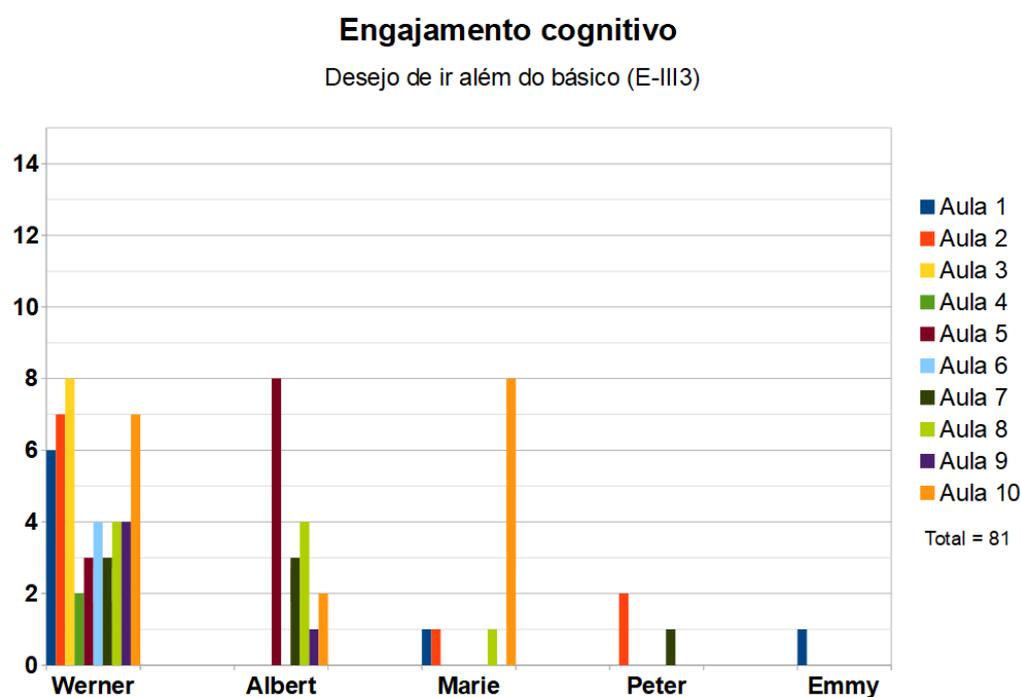


Figura 15 – Evolução do número de intervenções que manifestaram o terceiro indicador de engajamento cognitivo (desejo de ir além do básico, **E-III3**) dos cinco alunos com maior presença física nas aulas durante a sequência.

pouco menor na segunda aula do bloco, a sétima aula. Esse resultado indica que o aluno começa com um certo desejo de ir além do básico que se intensifica ao longo de uma mesma temática. Ele está inicialmente aberto a estabelecer as bases sobre uma determinada

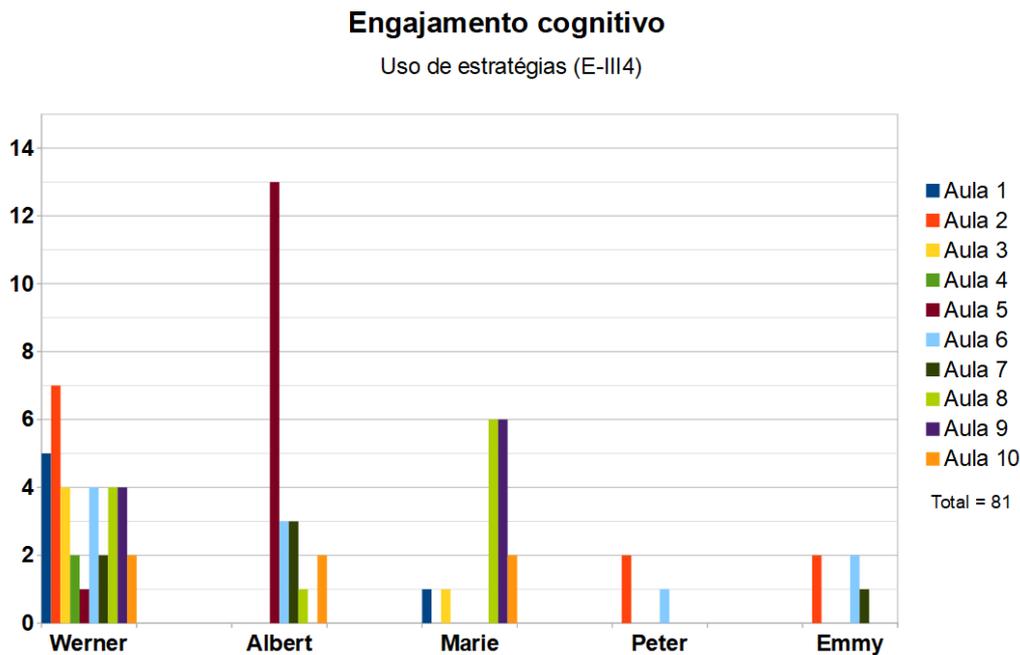


Figura 16 – Evolução do número de intervenções que manifestaram o quarto indicador de engajamento cognitivo (uso de estratégias, **E-III4**) dos cinco alunos com maior presença física nas aulas durante a sequência.

temática e, à medida que faz novas conexões, busca satisfazer as novas necessidades que surgem. Com relação ao uso de estratégias (**E-III4**), Werner demonstrou um uso constante delas com especial destaque para, além da avaliação de sua própria cognição, técnicas mais elaboradas de conexão entre as ideias discutidas em sala de aula. Dessa forma, este aluno demonstrou um grau elevado de engajamento cognitivo a partir do uso de estratégias. Portanto, acreditamos que Werner demonstrou ótimos níveis para todos os indicadores de engajamento cognitivo.

O aluno Albert, como já enfatizamos diversas vezes, participou intensamente a partir da quinta aula. Esta foi, inclusive, a aula em que manifestou alto grau de investimento no aprendizado (**E-III1**) e no desejo de ir além do básico (**E-III3**), bem como um uso elaborado de estratégias (**E-III4**). Somente o indicador de autonomia (**E-III2**) não foi tão frequente quanto sua incidência na décima aula. Durante todas as outras aulas, o aluno também apresentou graus perceptíveis em todos os quatro indicadores, com exceção da ausência dos indicadores de autonomia e do uso de estratégias na aula 9. No entanto, por ter se tratado de uma aula um pouco mais expositiva, consideramos que o aluno demonstrou um alto grau de investimento no aprendizado, na autonomia e no desejo de ir além do básico, com um nível perceptível do uso de estratégias. Portanto, o situamos em um nível ótimo nos três primeiros indicadores e em um nível regular no uso de estratégias.

Marie demonstrou alto grau de investimento no aprendizado (**E-III1**) e na autonomia (**E-III2**), enquanto o desejo de ir além do básico (**E-III3**) e o uso de estratégias (**E-III4**) foram perceptíveis, mas não tão incidentes quanto os demais indicadores. O desejo de ir

além do básico tornou-se muito forte na última aula da sequência, quando ela apresentou um seminário sobre matéria escura. Portanto, acreditamos que o estímulo à curiosidade desta aluna pode ser facilitado quando ela é solicitada diretamente a atuar no seu processo de ensino-aprendizagem por meio de pesquisa e apresentação, integrantes principais de uma carreira científica. A possibilidade de pesquisar sobre uma temática e apresentar para os colegas e o professor foi, primeiramente, vista como um desafio pela aluna. No começo de sua apresentação, ela demonstrou certo nervosismo, mas motivada pelo professor e colegas, chamou a responsabilidade da complexidade do desafio para si e demonstrou persistência, apresentando um excelente seminário que, inclusive, foi responsável por suscitar perguntas dos outros alunos e do professor. Além disso, seu seminário motivou que todos os alunos perguntassem sobre temáticas mais recentes da área de Física de Partículas no restante da aula. Portanto, consideramos que a aluna apresentou ótimo nível de investimento no aprendizado (**E-III1**) e na autonomia (**E-III2**), e um nível regular no desejo de ir além do básico (**E-III3**) e no uso de estratégias (**E-III4**).

Já Peter e Emmy demonstraram graus perceptíveis tanto de investimento no aprendizado (**E-III1**) e de autonomia (**E-III2**) e, portanto, consideramos ambos os alunos com nível regular nesses indicadores de engajamento cognitivo. No entanto, demonstraram grau fraco no desejo de ir além do básico (**E-III3**) e no uso de estratégias (**E-III4**) e, portanto, consideramos ambos os alunos com nível insatisfatório nesses indicadores.

Elaboramos a tabela 20 para resumir os níveis de engajamento dos cinco alunos considerados na análise. Os três primeiros indicadores estão relacionados ao engajamento

Engajamento	Indicador	Werner	Albert	Marie	Peter	Emmy
<b>comportamental</b>	Participação nas aulas	ótimo	ótimo	ótimo	regular	regular
	Participação/execução nas/das tarefas de sala	ótimo	regular	ótimo	regular	regular
	Participação/execução nas/das tarefas de casa	insatisf.	ótimo	ótimo	insatisf.	insatisf.
<b>emocional</b>	Emoção	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo
	Identificação com escola e/ou colegas	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo
	Identificação com professor	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo
	Atribuição de valores à Física ou às Ciências em geral	regular	ótimo	regular	ótimo	regular
<b>cognitivo</b>	Investimento no aprendizado	ótimo	ótimo	ótimo	regular	regular
	Autonomia	ótimo	ótimo	ótimo	regular	regular
	Desejo de ir além do básico	ótimo	ótimo	regular	insatisf.	insatisf.
	Uso de estratégias	ótimo	regular	regular	insatisf.	insatisf.

Tabela 20 – Níveis de engajamento (ótimo, regular ou insatisfatório) dos alunos Werner, Albert, Marie, Peter e Emmy, os mais presentes durante a sequência de aulas.

comportamental, enquanto os quatro indicadores seguintes se relacionam ao engajamento emocional. Já os quatro últimos indicadores representam o engajamento cognitivo dos

estudantes.

Mencionamos na análise de engajamento comportamental que, apesar de poucas interações na primeira aula, os alunos se engajaram cognitivamente, pois manifestaram entendimento sobre os tópicos da primeira aula quando foram perguntados sobre eles no início da segunda aula. Concluímos que o engajamento cognitivo não exigia, portanto, necessariamente, um maior engajamento comportamental. Pelo menos, em análises pontuais como essa, para uma ou duas aulas. No entanto, da tabela 20, percebemos um resultado diferente no contexto geral da sequência. De fato, percebemos em todos os cinco estudantes, níveis similares de engajamento comportamental e cognitivo, sugerindo que, no contexto geral da sequência, um maior engajamento comportamental parece implicar engajamento cognitivo.

Durante as aulas da sequência, o professor buscou informar os estudantes sobre o caminho que percorriam dentro da temática da Física de Partículas, esclarecendo os objetivos das aulas e das atividades propostas em sala e para casa. Portanto, promover esse entendimento dos estudantes sobre o caminho que estão percorrendo parece ser elemento fundamental para estabelecer a relação entre engajamento comportamental e cognitivo na sequência como um todo. Sobre essa relação não ocorrer da primeira para a segunda aula, acreditamos que é uma especificidade do fato de que, geralmente, os alunos não se sentem tão à vontade com um professor novo e, portanto, intervêm menos em sala de aula. No entanto, essa relação se aprimora à medida que os estudantes se sentem mais confortáveis em sala. Se olharmos para o caso de Albert, em particular, essa relação é evidente. De início, nas três primeiras aulas, sua participação durante as discussões em sala e nas tarefas de sala foi quase nula (ver gráfico 11). Da mesma forma, seu engajamento cognitivo (ver gráficos 13 a 16) também foi inexistente. A partir da quarta aula, seu engajamento comportamental em termos de participação nas aulas aumentou, e se intensificou ainda mais na quinta aula, quando atingiu os maiores graus desse indicador. Nessa aula, ele também apresentou os maiores graus de todos os indicadores de engajamento cognitivo.

Essa relação entre engajamento comportamental e cognitivo apenas quando os estudantes compreendem as atividades e o percurso em sala de aula é corroborada quando notamos que Peter e Emmy, que não estiveram presentes nas aulas 4 e 5, parecem ter perdido essa conexão nas aulas seguintes e, por isso, demonstraram apenas níveis regular ou insatisfatório nos indicadores de engajamento cognitivo.

Esse resultado dialoga com as investigações de [JÚLIO; VAZ; FAGUNDES \[2011\]](#) e [FARIA \[2008\]](#). O primeiro estudo, realizado a partir de coleta de dados em duas turmas da primeira série do ensino médio, encontrou que é tarefa do professor realizar intervenções para que o engajamento cognitivo também seja trabalhado a fim de que os estudantes não fiquem restritos somente a manifestações de engajamento comportamental e emocional. No segundo estudo, realizado a partir de atividades investigativas em pequenos grupos

de estudantes também da primeira série do ensino médio, os resultados sugerem uma associação do engajamento comportamental e do engajamento cognitivo somente quando os estudantes demonstram compreender os objetivos das atividades.

Não podemos realizar qualquer inferência sobre a situação contrária, ou seja, um maior engajamento cognitivo implicar engajamento comportamental. De fato, analisemos o engajamento cognitivo de Werner, Albert e Marie, por exemplo. Percebemos que, apesar de um ótimo nível de engajamento cognitivo de Werner, o aluno não se engajou na realização das tarefas de casa. Já Albert não participou de algumas tarefas de sala. Enquanto para Marie que, apesar de não apresentar ótimos níveis em todos os indicadores de engajamento cognitivo, demonstrou um excelente engajamento comportamental, sendo a única a participar bem tanto das aulas quanto das atividades em sala e para casa.

Com relação ao engajamento emocional, todos os estudantes demonstraram ótimos níveis de seus indicadores, com exceção do nível regular no indicador de atribuição de valores à Física e/ou às Ciências em geral (**E-II4**) para Werner, Marie e Emmy. No entanto, a atribuição de valores negativos pareceu ser natural no contexto da quinta aula do segundo bloco, quando lidou-se com as problemáticas da Física Nuclear. Cabe ressaltar que esse aspecto não parece ter influenciado negativamente o engajamento dos alunos em outros quesitos. Foram apenas constatações sobre a complexidade e a responsabilidade social do fazer científico, sendo esta última negligenciada até mesmo por cientistas algumas vezes.

Um engajamento emocional parece ser fundamental para que o engajamento comportamental possa ser também desenvolvido, pelo menos considerando os indicadores de engajamento comportamental referentes diretamente à sala de aula (a participação nas aulas – **E-I1** – e nas tarefas de sala – **E-I2**), pois, apesar de engajados emocionalmente, apenas dois dos cinco alunos também se engajaram no comportamento para realizar a atividade escrita para casa. Os indicadores de engajamento emocional se relacionam diretamente ao ambiente de aprendizagem. É fundamental que os estudantes se sintam à vontade na sala de aula que, além da estrutura física, deve propiciar uma ambiente amigável e de respeito mútuo entre colegas e professor. Só assim todos podem se sentir confortáveis para expressarem suas emoções e pensamentos sobre as discussões e atividades.

Os efeitos do ambiente de aprendizagem sobre o engajamento comportamental, o engajamento cognitivo e a aprendizagem dos estudantes são discutidos no estudo de [BORGES; JÚLIO; COELHO \[2005\]](#). Os resultados dessa investigação indicam que um ambiente de aprendizagem desenhado com características de abordagem do ensino centrada no aluno, enfoque na aprendizagem apoiada em colegas, respeito às características e necessidades individuais dos estudantes, e favorecimento do aumento da motivação e auto-estima dos alunos, consegue induzir o engajamento comportamental, mas não o cognitivo. Ainda que nem todos esses elementos tenham sido adotados também em nosso estudo, por exemplo não demos foco na aprendizagem apoiada em colegas, projetamos aulas

que contemplaram as outras características. Os indicadores que se relacionam a elas em nosso contexto são o de emoção (**E-II1**), e identificação com escola e/ou colegas (**E-II2**) e com o professor (**E-II3**). Portanto, acreditamos que nossos resultados concordam com o estudo citado.

Os estudantes Werner, Albert e Marie tiveram um maior aproveitamento dessa relação, convertendo o engajamento emocional em comportamental. Já os estudantes Peter e Emmy, ainda que tenham se manifestado emocionalmente, não puderam converter esse tipo de engajamento em comportamental tanto quanto os outros estudantes. Se o engajamento comportamental desses dois alunos já se situou em um nível apenas regular, a conversão do engajamento comportamental em cognitivo foi ainda mais desfavorecida. Acreditamos que o resultado para esses dois alunos está diretamente relacionado ao fato de que eles, entre os cinco alunos considerados, foram os que tiveram menos presença nas aulas. De fato, Peter frequentou sete aulas, enquanto Emmy apenas seis. Peter não esteve presente nas aulas 4, 5 e 10. Emmy não esteve presente nas aulas 4, 5, 9 e 10. Além disso, eles ainda frequentaram a oitava aula apenas por 30 minutos. Portanto, ainda que se manifestassem de maneira positiva emocionalmente, não converteram esse ambiente estimulante à aprendizagem em engajamento comportamental de maneira significativa.

## 3.2 Considerações dos estudantes e do professor

Nesta seção apresentamos o *feedback* dos alunos na atividade escrita para casa e no momento de *feedback* da última aula da sequência. Em diversas oportunidades também pudemos dialogar com os estudantes em momentos que antecediam e sucediam as aulas da sequência didática. Acreditamos que avaliar as potencialidades observadas durante alguns desses momentos poderia ser uma atividade igualmente rica em nosso estudo. Por isso, damos destaque também à análise desses momentos, mesclando com observações e comentários do professor responsável pela condução das aulas da sequência.

Em primeiro lugar comentamos sobre o texto escrito de Albert. Achemos fascinante o engajamento do aluno na atividade, demonstrado pelo fato de ele ter elaborado um documento em forma de relatório detalhado sobre as aulas, com seções e subseções, totalizando um total de 10 páginas. Comentamos nos próximos parágrafos os destaques dados pelo aluno com relação às aulas.

Na primeira seção, ele comentou sobre como a força eletromagnética predomina no nosso dia a dia e é mais forte do que a gravitacional. Ele deu destaque ao fato de que a luz é uma onda que se propaga na velocidade da luz. Em subseções, ele comentou sobre as características de atração e repulsão da força eletromagnética, enfatizando que hoje falamos de maneira unificada sobre a força eletromagnética. Na segunda seção, ele abordou tópicos sobre a força forte. Enfatizou sua necessidade para a estabilidade dos átomos, comentando

inclusive sobre a força forte residual mediada pelo pión. Uma subseção abordou a teoria da cromodinâmica quântica, em que ele comentou o porquê da existência dos quarks e suas características, como a carga cor.

Na terceira seção, ele abordou o decaimento radioativo, comentando sobre o decaimento do urânio-238, as bombas atômicas, e as catástrofes em Hiroshima, Nagasaki e Chernobyl. Nesse momento ele comentou “*Devido a isso é extremamente perigoso a geração de energia nas usinas nucleares, é muito benéfico devido a (sic) quantidade de energia gerada, mas muito perigoso também.*”. Especificamente sobre a fusão nuclear, ele foi além “*Essa aula de reações nucleares foi a minha favorita, falamos das bombas nucleares e da energia nuclear e como ocorre esses decaimentos, foi a que mais gostei.*”. Ele seguiu na próxima seção escrevendo sobre antimatéria, dando o exemplo do pósitron e trazendo temáticas atuais relacionadas, como a existência de mais matéria do que antimatéria no Universo. Por fim, ele comentou sobre a necessidade de uma nova interação fundamental, a fraca, a partir da conservação total de energia e dos momentos angular e linear, o que explicaria o decaimento beta e a existência de neutrinos. No final da seção, ele comentou “*Devo admitir que a força fraca foi a que eu menos entendi com relação as outras aulas, entretanto as aulas foram boas eu gostei delas (sic).*”.

Destacamos o interesse do aluno pela quinta aula, cuja temática e modo de condução do professor proporcionaram uma aula mais voltada aos princípios de um ambiente estimulante à alfabetização científica dos alunos. Não à toa, percebemos um maior envolvimento do aluno e a manifestação desse envolvimento por meio escrito, além do envolvimento emocional, comportamental e cognitivo, já analisados anteriormente. A manifestação do aluno com relação à aula sobre a força fraca ter sido a que ele menos entendeu é natural uma vez que, de todas as aulas, o fim da oitava aula e a nona aula, onde a interação fraca foi abordada, foram os momentos de caráter um pouco mais expositivo que as demais. Como já comentamos em outras oportunidades ao longo desse trabalho, isso ocorreu, pois o professor responsável pelas aulas queria finalizar o conteúdo preparado a fim de dedicar mais tempo na décima aula às eventuais apresentações dos alunos.

Comentamos agora sobre o texto escrito de Marie. No início dele, ela destacou as discussões em sala de aula sobre do que é feita a matéria, comentando o porquê de não atravessarmos os objetos. Em seguida, ela demonstrou entendimento sobre a interação gravitacional ser mais fraca do que a interação eletromagnética, relacionando-a com a situação em que esfregamos um pano de lã em um balão e depois aproximamos o balão do cabelo, que se arrepia. Ela seguiu comentando sobre as interações e suas partículas mediadoras, explicando sobre processos de decaimentos nucleares e a necessidade dos neutrinos usando como base as conservações de energia, momento angular e linear. Por fim, comentou sobre como se dá a visualização dessas interações a partir dos diagramas de Feynman.

No final de seu texto, Marie comentou sobre o que achou das aulas

Esses assuntos foram muito interessantes e fez (*sic*) com que eu criasse uma curiosidade maior para pesquisar sobre, (*sic*) já tenho o desejo de me formar em física e essas aulas faz (*sic*) que aumente (*sic*) essa vontade.

(Fonte: Atividade escrita da estudante Marie).

Notem o destaque sobre os assuntos, que ela comenta serem muito interessantes e capazes de criar uma curiosidade ainda maior para a pesquisa. A ideia deste trabalho partiu justamente dessa necessidade de trazer discussões de Física Contemporânea para alunos do ensino médio. Corroborados pela literatura, percebemos que muitos estudantes demonstram entusiasmo em aprender temas relacionados à Ciência e tecnologia, mas se veem desestimulados por um ambiente escolar que promove um conteúdo no geral antiquado, sem vislumbrar discussões sobre descobertas e aplicações tecnológicas contemporâneas.

Neste trabalho, acreditamos que um ambiente de aprendizagem formal com estímulo à alfabetização científica dos estudantes, contemplando elementos CTSA, aliado à condução dialógica das aulas pelo professor foi capaz de promover o engajamento dos estudantes para o fazer científico, despertando-lhes a uma curiosidade ainda maior pela Física. No caso de Marie, a curiosidade para pesquisar, atividade primordial na vida de um cientista, aumentou. Além disso, ela comenta que já desejava se formar em Física e que as aulas contribuíram para aumentar ainda mais esse desejo. Portanto, a fala de Marie corrobora que a sequência didática proposta com temática contemporânea e base na alfabetização científica, aliada à condução dialógica do professor responsável pelas aulas, engajou positivamente os alunos.

Com relação aos conceitos-chave abordados em sala de aula, chamamos a atenção para o fato de que os dois estudantes comentaram sobre quase os mesmos tópicos, demonstrando que eles parecem ter sido consolidados. É evidente que, se mais estudantes tivessem entregue a atividade escrita, poderíamos inferir essa relação. Aqui, como o número de alunos que retornou a atividade é baixo, podemos apenas sugerir que os conceitos foram consolidados por conta de suas menções com explicações na atividade. No entanto, quando levamos em consideração também as análises aula a aula e os momentos de revisão, percebemos que nossa afirmação se fortalece. De fato, os momentos de revisão serviram como um mapeamento geral de quais conceitos-chave da Física de Partículas permaneceram aula após a(s) outra(s) nas falas dos alunos, e elas concordam com os tópicos e conceitos mencionados tanto por Albert quanto por Marie em suas atividades escritas para casa.

Durante a última aula da sequência, o professor perguntou “*Mais perguntas? Mais alguma coisa que vocês queiram falar rapidamente?*”. A primeira, de Marie, foi “*Você vai continuar no ano que vem?*”. Como o professor que conduziu as aulas havia sido recentemente chamado para assumir cadeira em Universidade Federal com a perspectiva de mudança para outro estado, após aprovação em concurso para professor do Magistério

Superior, ele respondeu “*Não, acho que não.*”. Os estudantes reagiram desapontados “*Infelizmente não.*”. Percebemos assim outra manifestação de identificação com o professor pelos participantes da aula. Os alunos seguiram se manifestando satisfeitos com a sequência de aulas. Relataram que gostaram muito das aulas, que deu para entender, e que a sequência “*Foi legal!*”.

O estudante Werner perguntou se o projeto de extensão “Universo na Escola” poderia continuar com parceria na escola. Relembramos que as aulas da sequência relacionados à pesquisa neste trabalho foram frutos de parceria com tal projeto. Esse questionamento de Werner novamente ressalta o interesse e a curiosidade do estudantes por tópicos mais contemporâneos da Física, que são abordados no contexto do projeto de extensão. O professor respondeu que sim, que é objetivo do projeto levar a Física para fora da Universidade, então eles deveriam conversar com seus professores de Física na escola solicitando que mantivessem contato com os organizadores do projeto para levar outros pesquisadores para a escola com novos tópicos e sequências relacionados à Física Contemporânea.

O professor comentou com os alunos que, inicialmente, havia pensado em planejar apenas quatro aulas, mas elas teriam mais aspecto de palestras. Pensando, em conjunto com a autora deste trabalho, em como levar a temática de Física de Partículas de maneira significativa aos estudantes, sua ideia inicial passou por uma reformulação. O intuito das aulas passou a ser o de compreensão dos conceitos-chave da Física de Partículas, e relação com o enfoque CTSA, bem como o de exploração dos indícios de alfabetização científica e de engajamento dos estudantes. Certamente tais objetivos não poderiam ser atingidos em palestras puramente expositivas.

Os estudantes se manifestaram em concordância com o aumento no número de aulas. Marie comentou “*Ah, foi super legal!*”, e complementou a fala de Werner quando ele disse “*Se você terminasse nas 4 aulas a gente ia ficar...*” com “*Triste.*”. Werner prosseguiu “*Com várias aulas a menos. Vários encontros a menos.*”. Quando o professor mencionou que só conseguiria lidar com poucos tópicos caso o número de aulas fosse reduzido, Albert, enfático, confirmou que também achou melhor um maior número de aulas. Quando o professor comentou que, com mais aulas, deu para dialogar mais com os estudantes, visivelmente empolgados eles se manifestaram com “*É!*” e “*Sim!*”. O professor disse esperar que eles tivessem entendido e construído bastante coisa durante as aulas e os estudantes responderam com enfáticos “*Sim!*”.

De acordo com relato escrito do professor que conduziu as aulas, obtido pela autora após as intervenções,

A ideia era discutir Física de Partículas em um nível acessível a esses estudantes, mas que ao mesmo tempo fosse muito além de uma exposição de curiosidades ou da simples divulgação científica. Porque não basta simplesmente afirmar, por exemplo, que prótons e nêutrons são constituídos de quarks, é preciso discutir como chegamos a essa conclusão,

bem como as potenciais limitações dessa descrição. Tampouco é interessante espetacularizar a aula, abordar temas divertidos sem que haja uma contrapartida intelectual, uma aprendizagem significativa. Por isso não nos privamos de usar a matemática quando conveniente para a discussão Física, sem contudo recair em um ensino de fórmulas e exercícios.

(Fonte: Relato do professor responsável pela condução das aulas após o término das intervenções).

O professor relatou ainda como essa mudança na perspectiva de ensinar Ciências é urgente e necessária, concordando com a visão da autora,

O crescimento do negacionismo científico nos últimos anos, ainda que sem dúvida seja um fenômeno multifacetado, multi-causal, deve servir como um alerta para revermos a maneira como ensinamos ciência em todos níveis — desde o ensino básico ao superior.

O ensino de Física tem tradicionalmente enfatizado aspectos técnicos e métodos de solução de exercícios, em detrimento de discussões que visem a construção de conceitos, o desenvolvimento da capacidade crítica e de argumentos heurísticos, passando a impressão de que a Física se resume a cálculos, ao invés de os cálculos serem vistos como uma ferramenta auxiliar à discussão física. Mais ainda, negligenciamos amplamente o processo histórico-dialético que deu origem à determinada formulação teórica, tratando essa história como um apêndice (quando tanto!) e não como parte integrante desse conhecimento. Ou seja, quase não se fala das teorias e modelos alternativos então existentes, das concepções prévias que não vingaram, dos experimentos que favoreceram uma hipótese sobre outra, enfim, do processo de constante auto-negação que é próprio do processo científico. Ao invés disso entregamos ao estudante conhecimentos já prontos, para serem “absorvidos”, como se fossem obra da cabeça de alguns poucos indivíduos excepcionais aos quais devemos nos curvar. Ensinamos ciência como dogma, como uma coleção enciclopédica de fatos.

Além disso, muitos estudantes demonstram entusiasmo em aprender temas relacionados à ciência e tecnologia, mas são desestimulados por um conteúdo antiquado, que não vislumbra as discussões, descobertas e aplicações tecnológicas contemporâneas. Esse problema está atrelado ao anterior, porque é muito mais difícil abordar modelos alternativos ao padrão historicamente estabelecido quando se lida com teorias já consolidadas há séculos.

(Fonte: Relato do professor responsável pela condução das aulas após o término das intervenções).

Antes e após algumas aulas, alguns alunos me abordaram e também abordaram o professor para discutir assuntos diversos, relacionados, direta ou indiretamente, à temática das aulas. Sobre esses momentos o professor comentou que alguns se interessaram por detalhes da carreira de pesquisador, a viabilidade financeira de se viver de Ciência no país, os prós e contras, e até mesmo sobre a possibilidade de estudar no exterior, demonstrando que tinham interesse em seguir um caminho acadêmico-científico. Em outras ocasiões, os estudantes se manifestavam após alguma aula, afirmando terem se impressionado com algumas das discussões realizadas em sala (por exemplo, quando discutiram que nenhum objeto realmente encosta em outro, mas sempre há uma distância entre eles, devido à

repulsão eletromagnética entre orbitais eletrônicos), e afirmando, com entusiasmo, que certamente era aquilo que gostariam de estudar na Universidade.

O professor comentou ainda sobre como foi prazeroso notar que todos os estudantes que participaram das aulas tinham ambição de entrar em uma Universidade pública, ainda que não necessariamente para cursar Física. Ele disse que percebeu um genuíno interesse e gosto pelo saber científico, que, aliás, em suas próprias palavras “*Pode ser (e frequentemente é) até mais instigante e fantástico do que a ficção.*”.

Sobre alguns contratempos durante a sequência, ele comentou perceber que aspectos matemáticos, mesmo quando tratavam-se de cálculos algébricos simples, pareceram complicados para os estudantes. Como exemplo, ele citou

Por exemplo, era-lhes fácil compreender que a repulsão eletrostática faria a velocidade de uma carga diminuir quando se aproximasse de uma outra carga igual, mas quando esse mesmo efeito era escrito matematicamente, por conservação de energia cinética mais energia potencial, já não lhes parecia tão claro.

(Fonte: Relato do professor responsável pela condução das aulas após o término das intervenções).

Parece, assim, não haver uma completa apreensão da matemática enquanto linguagem, mas somente como um aglomerado de técnicas. Ou, dito de outra forma, mesmo que dominem a “gramática” dessa linguagem, não ficam confortáveis em se expressar semanticamente por meio dela. Isso é possivelmente uma consequência de um método formulaico de ensino com ênfase na resolução de exercícios abstratos.

Para o professor, a experiência foi positiva e muito gratificante. Ele disse ter sido notável o engajamento dos estudantes, o que possibilitou aulas bastante interativas. Por exemplo, sobre a quinta aula, do bloco de aulas sobre a Física Nuclear, ele comentou

A participação foi extraordinária na aula sobre Física Nuclear e suas aplicações tecnológicas, quando os discentes mostraram interesse em entender o funcionamento de aparelhos e técnicas usadas na medicina e em outros aspectos de seu cotidiano, como aparelhos de raios-X e ressonância. Isso ilustra bem as falhas de um ensino que não avança além da Física de meados do século XIX, e priva os estudantes de compreender esses elementos fundamentais do mundo que os cerca, bem como de participar das discussões em vigor no mundo contemporâneo — por exemplo, sobre os benefícios e ressalvas do uso de energia nuclear, os efeitos da radiação no corpo humano, como se proteger de sobre-exposição e quando não é preciso se preocupar, etc.

(Fonte: Relato do professor responsável pela condução das aulas após o término das intervenções).

O professor comentou ainda ter sido possível vislumbrar a viabilidade e as diversas vantagens de se ensinar Física através dessas temáticas contemporâneas, sem com isso sacrificar conteúdos tradicionais, mas integrando-os nessas discussões. Tal perspectiva de

ensino de Física voltada à alfabetização científica é interessante tanto para o professor, que se preocupa em promover um real processo de ensino-aprendizagem, quanto para o aluno que, imerso nesse processo, pode: i) compreender as relações entre Ciência, Sociedade, Tecnologia, e Meio-Ambiente; ii) compreender a natureza da Ciência e a ética do trabalho de um(a) cientista; iii) obter conhecimentos básicos e significativos sobre as Ciências. Dessa forma, os alunos se transformam em cidadãos críticos no mundo, sabendo lê-lo, entendendo suas necessidades para, então, transformá-lo [FREIRE \[2000\]](#); [CHASSOT \[2000, 2003\]](#); [GIL; VILCHES \[2001\]](#).

Por fim, o professor finalizou seu relato com comentário acerca da perspectiva de ensino adotada e promovida em conjunto com a sequência de aulas sobre Física de Partículas proposta neste trabalho, com o qual não ousamos discordar,

Trata-se de uma experiência que deveria ser repetida com mais frequência, até eventualmente integrar-se ao padrão, ao invés de ser a exceção.

(Fonte: Relato do professor responsável pela condução das aulas após o término das intervenções).

## Considerações finais

Neste trabalho apresentamos uma proposta de sequência didática sobre Física de Partículas para o ensino médio, que perpassou uma discussão sistematizada sobre o assunto e seus conceitos-chave, sobre a natureza das ciências e os fatores recorrentes na prática científica, bem como sobre as relações da temática com Tecnologia, Sociedade e Meio-Ambiente.

A proposta foi apresentada em detalhes na seção 2.5, a partir da descrição dos momentos explorados em cada uma das aulas e das atividades realizadas em sala de aula e para casa. Alicerçados em referenciais teóricos existentes na literatura, analisamos a mediação pedagógica da sequência didática e elaboramos indicadores para a análise dos indícios de alfabetização científica e de engajamento dos estudantes. Na seção 3.1, apresentamos a análise detalhada das aulas, contemplando o entendimento dos conceitos-chave da Física de Partículas pelos alunos, suas percepções sobre o assunto e as relações dele com o mundo, suas participações em sala e as trocas com o professor e colegas. Também destacamos o nível de participação dos estudantes, os indicadores de alfabetização científica que mais estiveram presentes em cada uma das aulas, os níveis de argumentação dos alunos, e demais observações que julgamos pertinentes. Em particular, na subseção 3.1.5, relacionamos as observações sobre os indicadores de alfabetização científica já levantados em cada uma das aulas ao contexto da sequência como um todo. Dessa forma, considerando as similaridades e modificações ao longo da sequência, obtivemos um panorama geral sobre o dinamismo nas ocorrências desses indicadores em sala de aula. Na seção 3.1.6, apresentamos a análise dos engajamentos comportamental, emocional e cognitivo dos alunos com maiores índices de presença em sala, estabelecendo suas incidências e como eles se desenvolveram ao longo das aulas. Também investigamos possíveis relações entre os tipos de engajamento. Por fim, apresentamos considerações tanto dos estudantes, a partir da análise das atividades escritas para casa e do momento de *feedback* durante a última aula da sequência, quanto do professor que conduziu as aulas, através de relato escrito à autora.

A análise detalhada das aulas mostrou um bom entendimento dos conceitos-chave da Física de Partículas pelos estudantes. Em primeiro lugar, porque eles expunham seus entendimentos sobre diversos conceitos e depois confirmavam a própria explanação com o professor. Em segundo lugar porque, nas suas intervenções durante as aulas, os estudantes utilizaram esses conceitos com autonomia para estruturar suas falas. Por fim, porque utilizavam esses conceitos corretamente ao explicar ideias trabalhadas no momento em questão para os próprios colegas. Cabe ressaltar também que, nas atividades escritas dos alunos, quase a totalidade dos conceitos sobre os quais eles escreveram com

autonomia foram iguais, o que fornece indícios de que tais conceitos foram consolidados. Como apenas dois alunos retornaram a atividade escrita em questão, esse resultado pôde ser apenas sugerido. No entanto, considerando também as análises aula a aula e os momentos de revisão das aulas, tal relação tornou-se evidente. Além disso, nos diversos momentos voltados a uma discussão sobre o funcionamento da Ciência, foram também apresentados, de maneira dialógica, conceitos científicos fundamentais, como evidência, hipótese, causalidade, definição, plausibilidade, justificativa. Estes foram utilizados pelos próprios alunos, de maneira espontânea, para dar força às suas argumentações em diversos momentos da sequência.

Os resultados indicam que a sequência aliada à dialogicidade do professor contribuiu para promover à alfabetização científica dos alunos, uma vez que foi elevada a incidência dos indicadores das ações do fazer científico, bem como das operações epistemológicas que os caracterizam. Todos os indicadores foram contemplados ao longo das aulas, variando aula a aula. Considerando a sequência como um todo, as maiores incidências das ações do fazer científico que trabalham com os dados de uma investigação foram a seriação de informações (**AC-I1A**) e a organização de informações (**AC-I1B**). A incidência de ações de estruturação do pensamento científico – o raciocínio lógico (**AC-I2A**) e o raciocínio proporcional (**AC-I2B**) – foi, no geral, equilibrada. Com relação às ações que buscam o entendimento da situação analisada, as maiores incidências foram de levantamento de hipóteses (**AC-I3A**), justificativa (**AC-I3C**) e explicação (**AC-I3E**). As caracterizações dessas ações também variaram a cada aula mas, na sequência como um todo, houve maior incidência das operações de causalidade (**AC-II3**), indução (**AC-II1**) e plausibilidade (**AC-II8**), nessa ordem.

Houve elevado grau de engajamento dos estudantes, principalmente dos tipos emocional e comportamental. Todos os estudantes demonstraram ótimos níveis nos indicadores de engajamento emocional relacionados à manifestação emocional (**E-II1**), à identificação com escola e/ou colegas (**E-II2**), e também à identificação com o professor (**E-II3**). Para alguns alunos, houve um equilíbrio na atribuição de valores à Física ou às Ciências (**E-II4**). Por um lado, ressaltaram aspectos negativos associados ao fazer científico sem responsabilidade ética e moral, por exemplo na participação de cientistas no desenvolvimento de explosivos nucleares. No entanto, a maioria também atribuiu valores positivos, como sua confiabilidade e consistência. Quanto aos níveis de engajamento comportamental, enquanto todos os cinco alunos analisados demonstraram níveis “regular” ou “ótimo” de participação nas aulas (**E-I1**) e nas tarefas de sala (**E-I2**), apenas dois alunos realizaram a única tarefa escrita solicitada para casa (**E-I3**). Portanto, o engajamento emocional parece influenciar o comportamental apenas durante as aulas propriamente ditas e as tarefas requisitadas em sala. Com relação ao engajamento cognitivo, os níveis “ótimo” e “regular” foram os mais frequentes. Apenas dois alunos demonstraram nível “insatisfatório” no desejo de ir além do básico (**E-III3**) e no uso de estratégias (**E-III4**). Portanto, no contexto geral da

sequência, concluímos que engajamento comportamental implica engajamento cognitivo, desde que haja uma compreensão dos estudantes sobre o percurso do conhecimento em sala de aula e os objetivos das atividades realizadas.

Esperamos que os resultados deste trabalho demonstrem a viabilidade de se incorporar temáticas da Física Moderna e Contemporânea no ensino médio, satisfazendo um longo desejo dos próprios alunos que, curiosos, acabam se envolvendo em um processo de ensino-aprendizagem que é de fato significativo para eles. Acreditamos que a efetividade da sequência foi fruto de uma perspectiva de ensino-aprendizagem aliada à dialogicidade do professor e voltada à alfabetização científica dos estudantes, com a incorporação de discussões sobre a natureza e a ética da Ciência, bem como de suas relações com Tecnologia, Sociedade e Meio-Ambiente. Além disso, obtivemos fortes indícios de engajamento por parte do estudantes.

Nossos resultados trazem implicações importantes para a área de ensino em Física. Embora existam algumas propostas de incorporação de temáticas da Física Moderna no ensino médio, são escassas as propostas que concretamente incorporam a Física Contemporânea no ensino médio, em particular a Física de Partículas. Além disso, nossa proposta não teve como objetivo simplesmente apresentar a Física de Partículas como um aglomerado de curiosidades e conceitos complicados, sem quaisquer relações com o mundo concreto dos estudantes. Muito pelo contrário, buscamos promover a alfabetização científica e, ao mesmo tempo, instigar o engajamento dos estudantes por meio dessa temática.

A análise detalhada das aulas pode ser útil a professores que, no futuro, queiram planejar aulas dentro dessa temática, com outras abordagens não-expositivas de ensino. Ela pode servir como orientação para que outros professores adaptem a temática aos seus propósitos, criando novas sequências didáticas sobre a Física de Partículas e/ou estimulando-os a elaborar sequências sobre outras temáticas da Física Moderna e Contemporânea. Por isso, apresentamos uma descrição detalhada das aulas, permitindo que os professores avaliem o que é ou não adaptável no contexto das salas de aula onde lecionam.

Em nosso caso, lidamos com uma turma relativamente pequena de estudantes, o que certamente facilita o trabalho de abordagens não-expositivas de ensino. Seria interessante investigar como adaptar temáticas mais contemporâneas da Física para turmas maiores. Por outro lado, em nosso contexto, os alunos participantes eram oriundos de séries diferentes do ensino médio, da 1<sup>a</sup> à 3<sup>a</sup> série. Logo, não pudemos assumir conhecimento de qualquer dos conteúdos geralmente já trabalhados na Física do ensino médio. Futuras investigações poderiam abordar, por exemplo, como mesclar temáticas mais contemporâneas com os conteúdos já tradicionais nas suas respectivas séries do ensino médio.

A contemporaneidade das temáticas discutidas em sala de aula favorece o ensino da Ciência enquanto construção histórico-social, indo muito além da transmissão de conteúdos de modo dogmático, enfatizando a Ciência enquanto processo de construção

coletiva. Permite discutir modelos alternativos para explicar fenômenos ou efeitos ainda incógnitos, bem como estimular a compreensão da natureza e da ética na Ciência, e de suas relações com Tecnologia, Sociedade e Meio-Ambiente. Além disso, promove o engajamento e a identificação dos estudantes com a Ciência, ao deixar claro que eles também podem contribuir para esse processo de construção. Em contraposição, o ensino de temáticas clássicas e conhecimentos consolidados já há mais de um século favorece a passividade, a mera absorção de um conhecimento já cristalizado, e um conseqüente desinteresse do discente por uma temática que tende a inferiorizá-lo ao invés de empoderá-lo. Além disso, essas discussões contemporâneas inserem o estudante no mundo em que vivem, possibilitando-os participar das discussões relevantes à sua realidade concreta. Por todos esses motivos, resta claro que a introdução de temáticas da Física Contemporânea na escola é uma necessidade urgente que deve se transformar em regra e não permanecer como exceção. Esperamos que esse trabalho contribua para esse fim.

## Referências

- AIKENHEAD, Glen S. Research into STS Science Education. **Educación Química**, Cidade do México, v. 16, n. 3, pp. 384-397, jul. 2005. Citado na página 19.
- AMES, Carole. Classrooms: Goals, structures, and student motivation. **Journal of Educational Psychology**, v. 84, n. 3, pp. 261-271, 1992. Citado na página 61.
- ARAUJO, Ives Solano; MAZUR, Eric. Instrução pelos colegas e ensino sob medida: uma proposta para o engajamento dos alunos no processo de ensino-aprendizagem de Física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 30, n. 2, pp. 362-384, ago. 2013. Citado na página 67.
- AUSUBEL, David P. **The acquisition and retention of knowledge**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. Citado na página 66.
- AZEVEDO, Maria Cristina P. Stella de. Ensino por investigação: problematizando as atividades em sala de aula. *In*: CARVALHO, Anna Maria Pessoa. (Org.). **Ensino de ciências: unindo a pesquisa e a prática**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, pp. 19-33, 2004. Citado na página 66.
- BACHELARD, Gaston. **A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento**. Tradução: Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Ed. Contraponto, 5ª reimpressão, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 74 e 89.
- BAKALARCZYK, Jonas. **Proposta didática investigativa para desenvolvimento do tema de física de partículas e interações fundamentais**. 240 pp. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Universidade de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2017. Citado na página 20.
- BASE NACIONAL CURRICULAR COMUM, Ministério da Educação, Governo Federal. <http://basenacionalcomum.mec.gov.br>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado na página 114.
- BORGES, Oto; JÚLIO, Josimeire Meneses; COELHO, Geide Rosa. **Efeitos de um ambiente de aprendizagem sobre o engajamento comportamental, o engajamento cognitivo e sobre a aprendizagem**. *In*: V Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, n. 5, 2005, Bauru. Atas do V ENPEC. Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 141.
- BRASIL, Lei Federal nº 9.394 de 20 de dezembro de 1996, Presidência da República, Brasília, DF, 1996. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19394.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19394.htm). Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado na página 114.

- BRASIL, Lei Federal nº. 13.4515 de 16 de fevereiro de 2017, Presidência da República, Brasília, DF, 2017. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/lei/l13415.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13415.htm). Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado na página 114.
- BRASIL, Portaria nº. 1.570 de 20 de dezembro de 2017, Ministério da Educação, Governo Federal, Brasília, DF, 2017. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/historico/PORTARIA1570DE22DEDEZEMBRODE2017.pdf>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado na página 114.
- BROPHY, Jere E. Socializing students' motivation to learn. *In*: MAEHR, Martin L.; KLEIBER, Douglas A. (Eds.), **Advances in motivation and achievement: enhancing motivation**, pp. 181-210. Greenwich, CT: JAI Press, 1987. Citado na página 61.
- BYBEE, Rodger. W. Science education and the science-technology-society (STS) theme. **Science Education**, v. 71, n. 5, pp. 667-683, out. 1987. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 23.
- CAPELARI, Danilo. **Uma sequência didática para ensinar relatividade restrita no ensino médio com o uso de TIC**. 100 pp. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016. Citado na página 38.
- CARDOSO, Dayane Carvalho. **A descoberta do elétron como tema gerador de um ensino de física mediado por experimentação remota**. 164 pp. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2016. Citado na página 34.
- Cargas e Campos**, PhET Simulações Interativas. Disponível em: [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/charges-and-fields](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/charges-and-fields). Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 71.
- CARVALHO, Anna Maria Pessoa. Critérios estruturantes para o ensino de Ciências. *In*: CARVALHO, Anna Maria Pessoa (Org.) *et al.* **Ensino de ciências: unindo a pesquisa e a prática**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, pp. 1-17, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 66.
- CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. O ensino de Ciências e a proposição de sequências de ensino investigativas. *In*: CARVALHO, Anna Maria Pessoa (Org.) *et al.* **Ensino de Ciências por investigação: condições para implementação em sala de aula**. São Paulo: Cengage Learning, 2017. Citado na página 97.

- CHASSOT, Attico. **Alfabetização científica: questões e desafios para a educação**. Ijuí: Editora UNIJUÍ, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 148.
- CHASSOT, Attico. Alfabetização científica: uma possibilidade para a inclusão social. **Revista Brasileira de Educação**. Rio de Janeiro, v. 2, pp. 89-100, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 148.
- COELHO, Geide Rosa. **A evolução do entendimento dos estudantes em eletricidade: um estudo longitudinal**. 173 pp. Tese (Doutorado). Faculdade de Educação, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2011. Citado na página 26.
- COELHO, Geide Rosa; AMANTES, Amanda. A influência do engajamento sobre a evolução do entendimento dos estudantes em eletricidade. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 13, n. 1, pp. 48-72, 2014. Citado na página 128.
- CONNELL, James P.; WELLBORN, James G. **Competence, autonomy, and relatedness: A motivational analysis of self-system processes**. In: GUNNAR, M. R. ; SROUFE, L. A. (Eds.), *Minnesota Symposium on Child Psychology*, v. 23. Chicago: University of Chicago Press, pp. 43-77, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 61.
- CORNO, Lyn; MADINACH, Ellen B. The role of cognitive engagement in classroom learning and motivation. **Educational Psychologist**, v. 18, n. 2, pp. 88-108, 1983. Citado na página 62.
- DRIVER, Rosalind; NEWTON, Paul; OSBORNE, Jonathan. Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms. **Science Education**, v. 84, n. 3, pp. 287-312, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 55, 56 e 57.
- DWECK, Carol S.; LEGGETT, Ellen L. A social-cognitive approach to motivation and personality. **Psychological Review**, v. 95, n. 2, pp. 256-273, 1988. Citado na página 61.
- Escola Viva**, Secretaria da Educação do Estado do Espírito Santo (SEDU-ES). Disponível em: [www.sedu.es.gov.br/escola-viva](http://www.sedu.es.gov.br/escola-viva). Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado na página 114.
- FARIA, Alexandre F. **Engajamento de estudantes em atividade de investigação: estudo em aula de Física do Ensino Médio**. 128 pp. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Educação, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2008. Citado na página 140.
- FARIA, Alexandre F.; VAZ, Arnaldo M. Students' engagement on a school investigation about simple electric circuits. **Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 21, e10545, pp. 1-27, 2019. Citado na página 26.

- FEYNMAN, Richard P.; LEIGHTON, Robert B.; SANDS Matthew. **Lições de Física de Feynman**. Porto Alegre: Bookman, 2008. Disponível em (em inglês): <http://www.feynmanlectures.caltech.edu/info>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado na página 36.
- FINN, Jeremy D. Withdrawing from school. **Review of Educational Research**, v. 59, n. 2, pp. 117-142, 1989. Citado na página 26.
- FINN, Jeremy D. **School engagement and students at risk**. Washington, DC: National Center for Education Statistics, 1993. Citado na página 26.
- FINN, Jeremy D.; PANNOZZO, Gina M.; VOELKL, Kristin E. Disruptive and Inattentive-Withdrawn Behavior and Achievement among Fourth Graders. **The Elementary School Journal**, v. 95, n. 5, pp. 421-434, mai. 1995. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 59.
- FINN, Jeremy D.; ROCK, Donald A. Academic success among students at risk for school failure. **Journal of Applied Psychology**, v. 82, n. 2, pp. 221-234, 1997. Citado na página 26.
- FRACALANZA, Hilário; AMARAL, Ivan Amorioso do; GOUVEIA, Mariley Simões Flória. **O ensino de Ciências no Primeiro Grau**. São Paulo: Atual, 1987. Citado na página 24.
- FREDERICKS, Jennifer A.; BLUMENFELD, Phyllis C.; PARIS, Alison H. School Engagement: Potential of the Concept, State of the Evidence. **Review of Educational Research**, v. 74, n. 1, pp. 59-109, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 58.
- FREIRE, Paulo. **A importância do ato de ler - em três artigos que se completam**. Coleção polêmicas do nosso tempo 4. 23ª ed. São Paulo: Cortez, 1989. Citado na página 23.
- FREIRE, Paulo. **Educação como prática da liberdade**. São Paulo: Paz e Terra, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 148.
- FREIRE, Paulo. **Pedagogia do Oprimido**. 60ª ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2016. Citado na página 24.
- GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. Citado na página 52.
- GIL, Daniel; VILCHES, Amparo. Una alfabetización científica para el siglo XXI: Obstáculos y propuestas de actuación. **Revista Investigación en la Escuela**, v. 43, pp. 27-37, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 148.

- GODOY, Arilda Schmidt. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. **Revista de Administração de Empresas**, v. 35, n. 2, pp. 57-63, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.
- GUERRA, Andreia; BRAGA, Marco; REIS, José Cláudio. Teoria da relatividade restrita e geral no programa de mecânica do ensino médio: uma possível abordagem. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 4, pp. 575-583, 2007. Citado na página 38.
- HALZEN, Francis; MARTIN, Alan D. **Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics**. John Wiley & Sons, 1984. Citado na página 39.
- HARTER, Susan. A new self-report scale of intrinsic versus extrinsic motivation in the classroom: motivational and informational component. **Development Psychology**, v. 17, n. 3, pp. 300-312, 1981. Citado na página 61.
- HURD, Paul DeH. Science literacy: its meaning for American schools. **Educational Leadership**, v. 16, pp. 13-16, 1958. Citado na página 24.
- Irradiando Carga**, PhET Simulações Interativas, Disponível em: [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/radiating-charge](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/radiating-charge). Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 72.
- JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, Maria Pilar; DÍAZ DE BUSTAMANTE, Joaquin; DUSCHL, Richard A. **Scientific culture and school culture: Epistemic and procedural components**. NARST annual meeting. San Diego, CA, abr. 1998. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.
- JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, Maria Pilar, RODRÍGUEZ, Anxela Bugallo; DUSCHL, Richard A., “Doing the Lesson” or “Doing Science”: Argument in High School Genetics. **Science Education**, v. 84, pp. 757-792, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 56.
- JÚLIO, Josimeire M.; VAZ, Arnaldo M.; FAGUNDES, Alexandre. Atenção: Alunos engajados - Análise de um grupo de aprendizagem em atividade de investigação. **Ciência & Educação**, v. 17, n. 1, pp. 63-81, 2011. Citado na página 140.
- KRASILCHIK, Myriam. **O professor e o currículo**. São Paulo: EDUSP, 1987. Citado na página 23.
- LAUGKSCH, Rüdiger C. Scientific Literacy: A Conceptual Overview. **Science Education**, v. 84, n. 1, pp. 71-94, 2000. Citado na página 24.
- LEE, Okhee; ANDERSON, Charles W. Task engagement and conceptual change in middle school science classrooms. **American Educational Research Journal**, v. 30, n. 3, pp. 585-610, set. 1993. Citado na página 59.

- LÓPEZ, José L. Luján; CERESO, José A. López. Educación CTS en acción: enseñanza secundaria y universidad. *In*: GARCÍA, Marta. I. González; CERESO, José A. López; LÓPEZ, José L. Luján. **Ciencia, tecnología y sociedad: una introducción al estudio social de la ciencia y la tecnología**. Madrid: Editorial Tecnos S. A., 1996. Citado na página 23.
- LÜDKE, Menga; ANDRÉ, Marli E. D. A. **Pesquisa em educação: abordagens qualitativas**. São Paulo: EPU, Temas Básicos de Educação e Ensino, 1986. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 51.
- MARQUES, Amanda Cristina Teagno Lopes; MARANDINO, Martha. Alfabetização científica, criança e espaços de educação não formal: diálogos possíveis. **Educação e Pesquisa**, São Paulo, v. 44, e170831, 2018. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-97022018000100431&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-97022018000100431&lng=pt&nrm=iso). Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado na página 19.
- MILAM, Scott. **Electrolysis of Water**. 2016. (5m39s) Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=vFR9zUGt2C4>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 67.
- MONTEIRO, Maria Amélia; NARDI, Roberto; BASTOS FILHOS, Jenner Barreto. Física Moderna e Contemporânea no ensino médio e a formação de professores: desencontros com a ação comunicativa e a ação dialógica emancipatória. **Revista electrónica de investigación en educación en Ciencias**, v. 8, n. 1., pp. 1-13, jun. 2013. Citado na página 19.
- MORAES, Viviane Rodrigues Alves de; TAZIRI, Jennifer. A motivação e o engajamento de alunos em uma atividade na abordagem do Ensino de Ciências por investigação. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 24, n. 2, pp. 72-89, 2019. Citado na página 52.
- NEWMANN, Fred M. Higher-order thinking and prospects for classroom thoughtfulness. *In*: NEWMANN, Fred M. (Ed.), **Student engagement and achievement in American secondary schools**. New York: Teachers College Press, pp. 62-91, 1992. Citado na página 59.
- NEWMANN, Fred; WEHLAGE, Gary G.; LAMBORN, Susie D. The Significance and Sources of Student Engagement. *In*: NEWMANN, Fred M. (Ed.), **Student engagement and achievement in American secondary schools**. New York: Teachers College Press, pp. 11-39, 1992. Citado na página 61.
- NOVAK, Gregor M.; PATTERSON, Evelyn; GAVRIN, Andrew; CHRISTIAN, Wolfgang. **Just-in-time teaching: blending active learning with web technology**. Pennsylvania State University: Prentice Hall, 1999. Citado na página 67.

- NOVO ENSINO MÉDIO, Ministério da Educação, Governo Federal, Brasília, DF, 2017. Disponível em: <http://novoensinomedio.mec.gov.br>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado na página 114.
- OLIVEIRA, Rita de Cássia Magalhães de. (Entre)linhas de uma pesquisa: o diário de campo como dispositivo de (in)formação na/da abordagem (Auto)biográfica. **Revista Brasileira de Educação de Jovens e Adultos**, v. 2, n. 4, pp. 69-87, 2014. Citado na página 31.
- Ondas de Rádio e Campos Eletromagnéticos**, PhET Simulações Interativas. Disponível em: [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/radio-waves](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/radio-waves). Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 73.
- OSTERMANN, Fernanda. Um Texto para Professores do Ensino Médio sobre Partículas Elementares, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 21, n. 3, pp. 415-436, 1999. Citado na página 20.
- OSTERMANN, Fernanda. **Tópicos de Física Contemporânea em escolas de nível médio e na formação de professores de Física**. 441 pp. Tese (Doutorado). Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Cláudio José de Holanda. **Teorias de Aprendizagem: Texto Introdutório**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, 2010. Citado na página 74.
- OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antonio. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, pp. 23-48, 2000. Citado na página 19.
- OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antonio. Física contemporânea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores. **Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas**, Barcelona, v. 18, n. 3, pp. 391-404, nov. 2000. Citado na página 19.
- OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antonio. Atualização do currículo de Física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 18, n. 2, pp. 135-151, ago. 2001. Citado na página 20.
- PEDUZZI, Luiz O. Q. Sobre a resolução de problemas no ensino de Física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 14, n. 3, pp. 229-253, dez. 1997. Citado na página 71.

- PELLA, Milton O.; O'HEARN, George T.; GALE, Calvin W. Referents to scientific literacy. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 4, pp. 199-208, 1966. Citado na página 25.
- PINTO, Alexandre Custódio; ZANETIC, João. É possível levar a Física Quântica para o Ensino Médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 16, n. 1, pp. 7-34, abr. 1999. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- PINTRICH, Paul R.; DE GROOT Elisabeth V. Motivated and self-regulated learning components of academic performance. **Journal of Educacional Psychology**, v. 82, n. 1, pp. 33-40, 1990. Citado na página 62.
- RABELO DE SÁ, Marcos Ribeiro. **Teoria da Relatividade Restrita e Geral ao longo do 1º ano do ensino médio: uma proposta de inserção**. 314 pp. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2015. Citado na página 38.
- SANTOS GOUW, Ana Maria. **As opiniões, interesses e atitudes dos jovens brasileiros frente à ciência: uma avaliação em âmbito nacional**. 242 pp. Tese (Doutorado). Ensino de Ciências e Matemática. Programa de Pós-Graduação em Educação. Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2013. Citado na página 20.
- SANTOS, Wildson Luiz Pereira dos; MORTIMER, Eduardo Fleury. Tomada de decisão para ação social responsável no ensino de Ciências. **Ciência e Educação**, v. 7, n. 1, pp. 95-111, 2001. Citado na página 23.
- SANTOS, Wildson Luiz Pereira dos; MORTIMER, Eduardo Fleury. Uma análise de pressupostos teóricos da abordagem C-T-S (Ciência - Tecnologia - Sociedade) no contexto da educação brasileira. **Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 2, n. 2, pp. 110-132, dez. 2002. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 23.
- SASSERON, Lúcia Helena. Alfabetização Científica, ensino por investigação e argumentação: relações entre ciências da natureza e escola. **Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 17, n. especial, pp. 49-67, nov. 2015. Citado 5 vezes nas páginas 21, 24, 66, 95 e 96.
- SASSERON, Lúcia Helena; CARVALHO, Anna Maria Pessoa. Almejando a alfabetização científica no ensino fundamental: a proposição e a procura de indicadores do processo. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 13, n. 3, pp. 333-352, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 23, 53, 54 e 57.
- SASSERON, Lúcia Helena; CARVALHO, Anna Maria Pessoa. Alfabetização Científica: uma revisão bibliográfica. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, pp. 59-77, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 21, 23 e 24.

- SASSERON, Lúcia Helena; SOUZA, Tadeu Nunes de. O engajamento dos estudantes em aula de Física: apresentação e discussão de uma ferramenta de análise. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 24, n. 1, pp. 139-153, abr. 2019. Citado na página 26.
- SCHREINER, Camilla; SJØBERG, Svein. Sowing the seeds of ROSE: Background, rationale, questionnaire development and data collection for ROSE (The Relevance of Science Education) - a comparative study of students' views of science and science education. **Acta Didactica**, Oslo, v. 4, set. 2004. Citado na página 20.
- SHAMOS, Morris H. **The myth of scientific literacy**. New Brunswick, New Jersey: Rutgers University Press, 1995. Citado na página 24.
- SHEN, Benjamin S. P. Science Literacy and the Public Understanding of Science. **Communication of Scientific Information**, pp. 44-52, Karger, Basel, 1975. Citado na página 25.
- SIEGEL, Ethan. This One Experiment Reveals More About Reality Than Any Quantum Interpretation Ever Will. **Forbes**, Setembro, 2019. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2019/09/18/this-one-experiment-reveals-more-about-reality-than-any-quantum-interpretation-ever-will/>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 77.
- SIQUEIRA, Maxwell Roger da Purificação. **Do Visível ao Indivisível: uma proposta de Física de Partículas Elementares para o Ensino Médio**. 257 pp. Dissertação (Mestrado). Ensino de ciências. Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- SJØBERG, Svein; SCHREINER, Camilla **The ROSE project: An overview and key findings**. University of Oslo, Noruega, mar. 2010. Citado na página 20.
- SOUZA JUNIOR, Domingos Rodrigues; COELHO, Geide Rosa. **Ensino por investigação: problematizando as aprendizagens em uma atividade sobre condutividade elétrica**. Atas do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, IX ENPEC. Águas de Lindóia, SP, 10 a 14 de novembro, 2013. Citado na página 66.
- STIPEK, Deborah. (2002). Good instruction is motivating. *In*: WIGFIELD, Allan; ECCLES, Jacquelynne S. (Eds.). **Development of achievement motivation: a volume in Educational Psychology**. San Diego, CA: Academic Press, 2002. Citado na página 59.
- SWINBANK, Elizabeth. Particle Physics: a new course for schools and colleges. **Physics Education**, University of York, UK, v. 27, n. 2, pp. 87-91, 1992. Citado na página 20.

- TED-Ed**, The Higgs explained in three easy GIFs. Outubro, 2013. Disponível em: <https://teded.tumblr.com/post/63567996483/the-higgs-explained-in-three-easy-gif>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 111.
- TERRAZZAN, Eduardo Adolfo. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de Física na escola de 2º grau. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 9, n. 3, pp. 209-214, jan. 1992. Citado na página 19.
- TOULMIN, Stephen Edelston. **Os Usos do Argumento**. 1a. ed., São Paulo: Martins Fontes, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.
- TOULMIN, Stephen Edelston. **The Uses of Argument**. 1st. ed., UK: Cambridge University Press, 1958. Citado na página 56.
- Universo na Escola**, Cosmo-UFES. Disponível em: <http://www.cosmo-ufes.org/universo-na-escola.html>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 29.
- VIGOTSKY, Lev S. **A Formação Social da Mente**. São Paulo: Martins Fontes, 1984. Citado na página 97.
- VOELKL, Kristin E. Identification with School. **American Journal of Education**, v. 105, n. 3, pp. 294-318, mai. 1997. Citado na página 26.
- WAKS, Leonard. J. Educación en ciencia, tecnología y sociedad: orígenes, desarrollos internacionales y desafíos actuales. In: MEDINA, Manuel; SANMARTÍN, José (Eds.) **Ciencia, tecnología a y sociedad: estudios interdisciplinarios en la universidad, en la educación y la gestión pública**. Barcelona: Anthropos, Leioa (Vizcaya): Universidad del País Vasco, 1990. Citado na página 23.
- WEHLAGE, Gary G. *et al.* **Reducing the risk: Schools as communities of support**. Philadelphia: Farmer Press, 1989. Citado na página 61.
- WEINSTEIN, Claire E.; MAYER Richard E. The teaching of learning strategies. **Innovation Abstracts**, v. V, n. 32, pp. 1-4, 1983. Citado na página 62.
- WELLBORN, James G.; CONNELL, James P. **Manual for the Rochester Assessment Package for Schools**. Rochester, NY: University of Rochester, 1987. Citado na página 59.
- ZANETIC, João. **Física também é cultura**. Tese (Doutorado). Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1989. Citado na página 19.
- ZIMMERMAN, Bary J. Self-regulated learning and academic achievement: an overview. **Educational Psychologist**, v. 25, n. 1, pp. 3-17, 1990. Citado na página 62.