



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS ANGICAL
LICENCIATURA EM FÍSICA

ANA BEATRIZ DE SOUZA GOMES

**O MODELO PADRÃO DAS PARTÍCULAS ELEMENTARES: fundamentos científicos
e elaboração de um livreto didático para o ensino médio**

ANGICAL, PIAUÍ
2026

ANA BEATRIZ DE SOUZA GOMES

O MODELO PADRÃO DAS PARTÍCULAS ELEMENTARES: fundamentos científicos e
elaboração de um livreto didático para o ensino médio

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia) apresentado como exigência parcial para a obtenção do diploma do Curso de Licenciatura em Física Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Angical.

Orientador: Prof. Dr. Wemerson José Alencar

ANGICAL, PIAUÍ
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Gomes, Ana Beatriz de Souza

G633m O modelo padrão das partículas elementares : fundamentos científicos e elaboração de um
livreto didático para o ensino médio / Ana Beatriz de Souza Gomes. - 2026.
54 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Angical, 2026.

Orientador : Prof Dr. Wemerson José Alencar.

Coorientador : Prof Dr. Antonio Sousa Ribeiro.

1. Física de partículas. 2. Modelo padrão. 3. Ensino de física. 4. Ensino médio. 5. Produto
educacional. I. Título.

CDD - 530

ANA BEATRIZ DE SOUZA GOMES

O MODELO PADRÃO DAS PARTÍCULAS ELEMENTARES: fundamentos científicos e elaboração de um livreto didático para o ensino médio

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia) apresentado como exigência parcial para a obtenção do diploma do Curso de Licenciatura em Física Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Angical.

Aprovada em 07/08/2026.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Wemerson José Alencar(Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Antonio Sousa Ribeiro (Coorientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Profa. Dra. Wanêssa Façanha da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luís Rodolfo dos Santos Filho
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

ANGICAL, PIAUÍ
2026

À minha mãe, Adriana Sousa, por ser meu maior exemplo de força, amor e dedicação.
Esta conquista também é sua, pois seu apoio e incentivo sempre iluminaram o meu
caminho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha mãe, Adriana Sousa, por ter sido, em todos os momentos da minha vida, o meu maior alicerce. Obrigada por nunca ter me deixado desamparada, por acreditar em mim quando eu mesma duvidei e por caminhar ao meu lado em cada etapa desta jornada. Nada do que conquistei seria possível sem o seu amor, sua força e seus inúmeros sacrifícios. Este trabalho também é seu.

Dedico este trabalho à minha família, que sempre foi o meu porto seguro: à minha avó, Maria Judith; à minha tia, Adriele Alencar; aos meus primos, que considero como irmãos, Rayssa Alencar e Everton Alencar; e ao meu querido sobrinho, Lorenzo Ravi. Vocês são a minha família, o meu lar e uma das maiores razões pelas quais nunca deixei de seguir em frente. Mesmo diante de todas as dificuldades que enfrentamos, o amor que nos une sempre foi maior. Esta conquista também pertence a cada um de vocês.

Agradeço, com muito carinho, aos meus amigos, tanto os que fazem parte da minha vida desde a infância quanto aqueles que a Física me presenteou ao longo da graduação. Obrigada por compartilharem comigo tantos momentos, pelas conversas, pelas risadas, pelo apoio e, principalmente, por permanecerem ao meu lado nos dias bons e nos dias difíceis. Em especial, agradeço ao meu amigo Daniel Sousa, que sempre me incentivou, acreditou em mim e nunca deixou que eu desistisse. Seu apoio e sua confiança no meu potencial fizeram toda a diferença durante essa caminhada.

Agradeço, de forma especial, aos meus orientadores, Prof. Wemerson José Alencar e Prof. Antônio Sousa, pela orientação, dedicação, paciência e pelos conhecimentos compartilhados ao longo deste trabalho. Minha sincera gratidão por toda a contribuição para a realização desta pesquisa.

Agradeço ao Instituto Federal do Piauí (IFPI), instituição que me proporcionou toda a estrutura necessária para a minha formação acadêmica e para o desenvolvimento deste trabalho. Também expresso minha gratidão ao Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência (PIBID), que foi fundamental na minha trajetória, proporcionando experiências enriquecedoras, importantes aprendizados e contribuindo significativamente para a minha formação.

Por fim, agradeço a todos os professores que fizeram parte da minha formação acadêmica. Cada ensinamento, incentivo e contribuição foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Levarei comigo não apenas o conhecimento adquirido, mas também os exemplos e aprendizados que marcaram esta trajetória.

*“É mais importante que uma equação seja bela do que
que ela esteja de acordo com o experimento.”.*

Paul A. M. Dirac

RESUMO

Este trabalho apresenta uma abordagem didática da Física de Partículas Elementares, com ênfase no Modelo Padrão, destinada a estudantes do Ensino Médio. A pesquisa parte da necessidade de ampliar a presença de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea na Educação Básica, aproximando os estudantes de conhecimentos científicos relacionados à constituição da matéria e às interações fundamentais da natureza. Metodologicamente, caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, bibliográfica, documental, exploratória e aplicada, fundamentada em livros, artigos científicos, documentos educacionais e materiais de divulgação científica. Como produto educacional, foi elaborado um livreto ilustrado que apresenta, em linguagem acessível, os quarks, léptons, bósons mediadores, o bóson de Higgs, a antimatéria e algumas limitações do Modelo Padrão. O material procura articular rigor científico, contextualização histórica e recursos visuais, favorecendo a compreensão de conceitos frequentemente considerados abstratos. Conclui-se que a transposição didática desses conteúdos pode contribuir para a atualização curricular do ensino de Física, estimular a curiosidade científica e proporcionar aos estudantes uma visão mais ampla sobre a matéria, as forças fundamentais e os desafios atuais da ciência.

Palavras-chave: física de partículas; Modelo Padrão; ensino de Física; Ensino Médio; produto educacional.

ABSTRACT

This work presents a didactic approach to Elementary Particle Physics, with emphasis on the Standard Model, aimed at high school students. The study is motivated by the need to broaden the inclusion of Modern and Contemporary Physics topics in basic education, bringing students closer to scientific knowledge about the fundamental constituents of matter and the interactions that govern nature. Methodologically, the research is characterized as qualitative, bibliographical, documentary, exploratory, and applied, based on textbooks, scientific articles, educational documents, and science communication materials. As an educational product, an illustrated catalog was developed to introduce quarks, leptons, gauge bosons, the Higgs boson, antimatter, and some limitations of the Standard Model through accessible language. The material combines scientific rigor, historical context, and visual resources to facilitate the understanding of concepts that are often considered abstract. It is concluded that the didactic transposition of Elementary Particle Physics can contribute to updating the physics curriculum, stimulate scientific curiosity, and provide students with a broader understanding of matter, the fundamental interactions, and the current challenges of modern physics.

Keywords: elementary particle physics; Standard Model; physics education; high school education; educational product.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação ilustrativa do livreto didático <i>Partículas Elementares: Guia Oficial do Tecido da Realidade</i>	39
Figura 2 – QR Code para acesso à versão digital do livreto educacional	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RE	Relatividade Especial
TL	Transformação de Lorentz
BNCC	Base Nacional Comum Curricular

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	Fator de Lorentz
$\eta_{\mu\nu}$	Métrica do espaço-tempo de Minkowski
$(-, +, +, +, +)$	Assinatura de Métricas de Minkowski
$\hat{e}_i$	Vetor de base coordenadas cartesianas
$\mathbf{e}_\mu, \mathbf{e}^\mu$	Vetores de Base espaço-tempo de Minkowski
v_μ	Vetor Covariante
v^μ	Vetor Contravariante
τ	Tempo próprio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	DA ESTRUTURA DA MATÉRIA AO MODELO PADRÃO	18
2.2	FUNDAMENTOS FÍSICOS DO MODELO PADRÃO	21
2.3	O ENSINO DA FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA	25
2.4	FUNDAMENTOS PEDAGÓGICOS E MEDIAÇÃO DOCENTE	27
3	METODOLOGIA	30
3.1	CARACTERIZAÇÃO, DELIMITAÇÃO E CONSTITUIÇÃO DO CORPUS	30
3.2	FUNDAMENTOS E PROCEDIMENTOS DA ELABORAÇÃO DO PRO- DUTO	32
3.3	CRITÉRIOS DE ANÁLISE E POTENCIALIDADES PEDAGÓGICAS	34
4	POTENCIALIDADES PEDAGÓGICAS DO PRODUTO EDUCACIONAL	37
4.1	DISPONIBILIZAÇÃO, ACESSIBILIDADE E DISSEMINAÇÃO DO PRO- DUTO EDUCACIONAL	37
4.2	MEDIAÇÃO DIDÁTICA, ATUALIZAÇÃO CURRICULAR E ORGANIZA- ÇÃO CONCEITUAL	40
4.3	RECURSOS VISUAIS, APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E NATU- REZA DA CIÊNCIA	42
4.4	POSSIBILIDADES DE UTILIZAÇÃO PEDAGÓGICA E INTEGRAÇÃO CURRICULAR	44
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

A compreensão da estrutura da matéria constitui uma das questões centrais da Física. Ao longo da história, diferentes modelos foram formulados para explicar a constituição dos corpos, desde as primeiras concepções atomistas até as teorias contemporâneas sobre partículas elementares e interações fundamentais. Esse percurso revela que o conhecimento científico não se desenvolve de maneira linear nem permanece imutável: ele resulta da elaboração de hipóteses, do confronto com evidências experimentais e da revisão contínua dos conceitos utilizados para descrever a natureza^{1,2}.

Os avanços da Mecânica Quântica, da Relatividade Especial e da Teoria Quântica de Campos, sobretudo a partir do século XX, permitiram aprofundar a compreensão da matéria em escalas subatômicas. Nesse processo, o Modelo Padrão das Partículas Elementares consolidou-se como o principal arcabouço teórico para organizar os constituintes fundamentais conhecidos e descrever três das quatro interações fundamentais da natureza. Quarks e léptons constituem a matéria elementar, enquanto fótons, glúons e bósons $W^\pm$ e Z^0 estão associados à mediação das interações eletromagnética, forte e fraca. O bóson de Higgs, por sua vez, relaciona-se ao mecanismo responsável pela geração de massa das partículas elementares no interior da teoria.

Apesar de sua relevância científica, histórica e tecnológica, a Física de Partículas ainda ocupa espaço reduzido no Ensino Médio. Em muitos contextos escolares, o ensino de Física permanece concentrado predominantemente em conteúdos da Física Clássica, indispensáveis à formação básica, mas insuficientes para apresentar a amplitude da ciência desenvolvida nos séculos XX e XXI. Quando os temas contemporâneos são omitidos ou tratados apenas de maneira episódica, pode-se reforçar entre os estudantes a percepção de que a Física constitui um campo concluído, restrito a teorias formuladas antes das transformações conceituais produzidas pela Relatividade e pela Mecânica Quântica.

A inserção de conteúdos contemporâneos no currículo escolar pode ampliar a compreensão dos estudantes sobre a estrutura da matéria, aproximá-los das investigações científicas atuais e favorecer relações entre ciência, tecnologia e sociedade. Além de apresentar resultados consolidados, a Física de Partículas permite discutir questões ainda abertas, como a natureza da matéria escura, a assimetria entre matéria e antimatéria e a ausência de uma descrição quântica completa da gravidade. Esses problemas evidenciam que a ciência permanece em construção e podem estimular a curiosidade, a investigação e a argumentação fundamentada.

Essa perspectiva está em consonância com a Base Nacional Comum Curricular, que valoriza a compreensão de modelos científicos, a análise de fenômenos, a

argumentação apoiada em evidências e a comunicação por meio de diferentes linguagens na área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias³. A abordagem do Modelo Padrão pode, portanto, contribuir para uma formação científica mais ampla, na qual os estudantes reconheçam a ciência como atividade histórica, coletiva, provisória e passível de aperfeiçoamento.

A presença desse tema na Educação Básica, entretanto, exige mediação didática cuidadosa. O Modelo Padrão apoia-se em conceitos abstratos e em um formalismo matemático que ultrapassa os conhecimentos normalmente desenvolvidos no Ensino Médio. Sua abordagem escolar não deve reproduzir de maneira reduzida o conteúdo universitário, mas selecionar conceitos estruturantes, reorganizar a linguagem e construir formas de apresentação coerentes com os conhecimentos prévios e com as finalidades formativas dessa etapa de ensino.

Esse processo relaciona-se à transposição didática, compreendida como a transformação do saber científico em conhecimento organizado para fins de ensino¹. Tal transformação não consiste em eliminar a complexidade até restarem apenas definições superficiais, mas em preservar as relações conceituais essenciais e adequar sua apresentação ao contexto educacional. No caso da Física de Partículas, isso implica distinguir partículas elementares de partículas compostas, apresentar a organização dos férmions e bósons, associar os bósons mediadores às interações fundamentais e explicitar os limites do Modelo Padrão sem exigir o domínio do formalismo completo da Teoria Quântica de Campos.

A aprendizagem significativa também oferece fundamento para essa proposta ao destacar a necessidade de relacionar novos conhecimentos a conceitos já presentes na estrutura cognitiva dos estudantes^{2,4}. Conteúdos como átomo, núcleo, próton, nêutron, elétron, carga elétrica, massa e conservação da energia podem funcionar como pontos de partida para a introdução progressiva de quarks, léptons, hádrons, bósons mediadores e antimatéria. Essa articulação permite ampliar conhecimentos já estudados e evita que o Modelo Padrão seja apresentado como uma coleção isolada de nomes e propriedades.

Diante desse cenário, o problema que orienta esta pesquisa pode ser formulado nos seguintes termos: de que maneira um material didático visual, conceitualmente organizado e cientificamente consistente pode contribuir para apoiar a abordagem introdutória do Modelo Padrão das Partículas Elementares no Ensino Médio? A resposta proposta neste trabalho assume a forma de um livreto didático destinado principalmente a professores e estudantes dessa etapa da Educação Básica.

O objetivo geral consiste em elaborar um livreto didático sobre o Modelo Padrão das Partículas Elementares que apresente os principais constituintes da matéria e as interações fundamentais de maneira visual, organizada, acessível e conceitualmente rigorosa. De forma específica, busca-se sistematizar os fundamentos históricos e cientí-

ficos relacionados à evolução das concepções sobre a matéria; apresentar as principais classes de partículas que integram o Modelo Padrão; discutir, em nível introdutório, as interações fundamentais e o papel dos bósons mediadores; organizar essas informações em linguagem compatível com o Ensino Médio; e analisar as potencialidades pedagógicas do material para o planejamento docente e para a formação científica dos estudantes.

O livreto constitui o principal produto educacional da pesquisa. Sua estrutura reúne informações sobre quarks, léptons, bósons, partículas compostas, interações fundamentais, bóson de Higgs e antimatéria. Textos sintéticos, ilustrações, tabelas e esquemas são empregados para favorecer a comparação de propriedades, a identificação de padrões e a compreensão das relações entre partículas e interações. O objetivo não é oferecer apenas uma listagem de componentes, mas apresentar uma organização capaz de evidenciar classificações, funções físicas e conexões conceituais.

Concebido como instrumento de mediação pedagógica, o produto não substitui a ação do professor nem a consulta a referências especializadas. Sua função é oferecer apoio inicial à introdução de conteúdos frequentemente considerados abstratos ou pouco presentes nos livros didáticos. O material pode integrar aulas expositivas dialogadas, leituras orientadas, atividades de classificação, construção de mapas conceituais, projetos interdisciplinares e ações de divulgação científica. Em todos esses usos, a mediação docente permanece indispensável para relacionar as informações do livreto aos conhecimentos prévios dos estudantes, explicitar os limites das representações visuais e adequar a profundidade da abordagem às condições da turma.

Metodologicamente, a pesquisa caracteriza-se como qualitativa, bibliográfica, documental, exploratória e aplicada. O levantamento bibliográfico fundamentou os conceitos físicos e os referenciais educacionais mobilizados, enquanto a análise documental permitiu relacionar a proposta às orientações curriculares nacionais, especialmente à Base Nacional Comum Curricular. O caráter exploratório manifesta-se na investigação de possibilidades para a abordagem escolar da Física de Partículas, e a natureza aplicada concretiza-se na elaboração do livreto como recurso destinado a uma situação real de ensino.

O produto educacional não foi aplicado sistematicamente em sala de aula. Por essa razão, esta pesquisa não apresenta resultados empíricos sobre ganhos de aprendizagem, interesse ou desempenho dos estudantes. As análises desenvolvidas referem-se à consistência científica, à organização didática e às potencialidades pedagógicas do material. Sua aplicação, avaliação e validação junto a professores e estudantes constituem possibilidades para estudos posteriores. Essa delimitação evita atribuir ao livreto efeitos que ainda não foram investigados e define com precisão o alcance das conclusões apresentadas.

A relevância do trabalho reside, portanto, na elaboração de um recurso que

busca aproximar a Educação Básica da Física contemporânea sem abandonar o rigor conceitual. Ao reorganizar conhecimentos complexos em uma estrutura visualmente orientada e pedagogicamente fundamentada, o livreto pode ampliar as possibilidades de abordagem do Modelo Padrão no Ensino Médio e contribuir para uma formação científica mais atual, crítica e integrada. Seu valor não decorre apenas do conteúdo reunido, mas da tentativa de estabelecer uma ponte entre o conhecimento científico de referência, os objetivos curriculares e o trabalho concreto do professor.

Esta monografia está organizada da seguinte forma: O Cap.(2) reúne a fundamentação teórica, abordando a evolução histórica das concepções sobre a matéria, os elementos centrais do Modelo Padrão, a Equação de Dirac, aspectos introdutórios da Teoria Quântica de Campos e os referenciais educacionais que sustentam a proposta. O Cap.(3) descreve o percurso metodológico, a natureza da pesquisa, os critérios de seleção dos conteúdos e os procedimentos empregados na elaboração do livreto. O Cap.(4) apresenta o produto educacional, as potencialidades pedagógicas do livreto, sua organização, seus recursos visuais e os critérios científicos e pedagógicos utilizados em sua construção. Por fim, o Cap.(5) reúne as considerações finais, retoma as principais contribuições do estudo e indica perspectivas de aplicação, avaliação e aperfeiçoamento do material.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A compreensão da constituição da matéria ocupa posição central na história da Física. Das primeiras concepções atomistas ao Modelo Padrão das Partículas Elementares, o conhecimento científico foi construído por sucessivas reformulações motivadas por novas evidências experimentais, avanços instrumentais e exigências de coerência teórica. Essa trajetória evidencia o caráter histórico, dinâmico e provisório da ciência e permite articular conteúdos tradicionalmente abordados no Ensino Médio, como modelos atômicos, eletricidade, radioatividade e energia, com temas da Física Moderna e Contemporânea⁵⁻⁷.

Este capítulo reúne os fundamentos científicos e didático-pedagógicos que sustentam o produto educacional desenvolvido nesta pesquisa. A discussão inicia-se com a evolução histórica das concepções sobre a matéria, prossegue com a organização das partículas elementares e das interações fundamentais, apresenta a Equação de Dirac, a Teoria Quântica de Campos e a estrutura do Modelo Padrão, e culmina na análise das possibilidades de inserção desses conteúdos no Ensino Médio. Essa sequência busca estabelecer uma articulação entre a construção histórica do conhecimento físico e sua sistematização contemporânea, integrando referenciais da Aprendizagem Significativa de Ausubel, da Transposição Didática de Chevallard, da abordagem histórico-epistemológica da Ciência e das orientações da BNCC, os quais fundamentam a organização e a elaboração do livreto didático proposto.

2.1 DA ESTRUTURA DA MATÉRIA AO MODELO PADRÃO

A ideia de que a matéria seria constituída por unidades fundamentais remonta à filosofia grega. Leucipo e Demócrito defenderam a existência de partículas indivisíveis denominadas átomos. Embora essa concepção não se apoiasse em evidências experimentais, ela introduziu uma questão que atravessaria séculos: seria possível explicar a diversidade dos materiais a partir de poucos constituintes elementares?

No início do século XIX, John Dalton formulou a primeira teoria atômica moderna, concebendo os átomos como partículas maciças, indivisíveis e características de cada elemento químico. Apesar de posteriormente superado, esse modelo forneceu uma base corpuscular para a interpretação das leis químicas^{8,9}. No final daquele século, a identificação do elétron por J. J. Thomson demonstrou que o átomo possuía estrutura interna. Em seguida, os experimentos de espalhamento de partículas alfa realizados por Geiger e Marsden, sob orientação de Ernest Rutherford, indicaram que quase toda a massa e a carga positiva do átomo estavam concentradas em uma pequena região central, o núcleo^{10,11}.

O modelo nuclear não explicava, entretanto, a estabilidade atômica nem os espectros discretos observados experimentalmente. Em 1913, Niels Bohr introduziu estados estacionários de energia e transições quânticas, obtendo sucesso na descrição do átomo de hidrogênio ¹². A transformação conceitual mais profunda ocorreu na década de 1920, com a formulação da Mecânica Quântica. As contribuições de de Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Born e Pauli substituíram a descrição baseada em órbitas definidas por uma formulação probabilística apoiada em estados quânticos.

Essa evolução não deve ser interpretada como simples sucessão de erros e acertos. Cada modelo respondeu a problemas específicos e permaneceu válido dentro de determinados limites. O modelo de Bohr, por exemplo, ainda possui utilidade didática na introdução à quantização da energia, embora não constitua a descrição quântica completa do átomo. A história dos modelos atômicos mostra, assim, que o conhecimento científico é construído por aproximações sucessivas, cujos alcances e limitações precisam ser reconhecidos.

A descoberta do núcleo também não encerrou a investigação sobre a matéria. Prótons e nêutrons foram inicialmente considerados elementares, mas experimentos de altas energias revelaram grande quantidade de mésons, bárions e ressonâncias. A necessidade de organizar essa “zoologia de partículas” levou Murray Gell-Mann e George Zweig a proporem, independentemente, o modelo de quarks ^{13–15}. Nesse modelo, prótons e nêutrons são bárions compostos por três quarks, enquanto os mésons são formados por pares quark-antiquark.

A composição de valência dos núcleons é expressa por

$$p = uud, \quad (2.1)$$

$$n = udd. \quad (2.2)$$

As cargas fracionárias dos quarks reproduzem as cargas observadas. Para o próton,

$$Q_p = \left(+\frac{2}{3}\right)e + \left(+\frac{2}{3}\right)e + \left(-\frac{1}{3}\right)e = +e, \quad (2.3)$$

enquanto, para o nêutron,

$$Q_n = \left(+\frac{2}{3}\right)e + \left(-\frac{1}{3}\right)e + \left(-\frac{1}{3}\right)e = 0. \quad (2.4)$$

Essa decomposição estabelece uma conexão direta entre conhecimentos escolares sobre carga elétrica e a estrutura subnuclear da matéria. Contudo, prótons e nêutrons não consistem apenas em três objetos estáticos. Sua estrutura envolve quarks de valência, pares quark-antiquark e um campo dinâmico de glúons. A passagem do átomo aos quarks mostra que aquilo que os cientistas consideram a menor unidade da matéria pode mudar à medida que novas experiências são realizadas e tecnologias mais avançadas permitem observar estruturas cada vez menores.

Na Física contemporânea, uma partícula é considerada elementar quando não apresenta estrutura interna conhecida nas escalas experimentalmente acessíveis. Essa definição é operacional: afirmar que o elétron é elementar significa reconhecer que, até o presente, não foram observados constituintes menores. As partículas do Modelo Padrão são classificadas segundo o spin. Férmions possuem spin semi-inteiro e obedecem ao princípio de exclusão de Pauli; bósons possuem spin inteiro. Os férmions elementares organizam-se em quarks e léptons distribuídos em três gerações, cada uma contendo dois quarks, um lépton carregado e um neutrino.

Geração	Quarks	Léptons
Primeira	u, d	e^-, ν_e
Segunda	c, s	μ^-, ν_μ
Terceira	t, b	τ^-, ν_τ

A primeira geração reúne as partículas que formam toda a matéria comum do Universo. Já as partículas da segunda e da terceira gerações são mais pesadas e instáveis, existindo por tempos muito curtos e sendo produzidas em fenômenos de alta energia, como os raios cósmicos ou as colisões realizadas em aceleradores de partículas. Os quarks participam das interações forte, fraca e eletromagnética, enquanto os léptons participam apenas das interações fraca e eletromagnética. Cada partícula também possui uma antipartícula, que apresenta a mesma massa e o mesmo spin, mas possui cargas elétricas e outras propriedades quânticas com sinais opostos.

Os bósons são as partículas responsáveis por transmitir as interações fundamentais da natureza. O fóton está associado à interação eletromagnética, os glúons à interação forte e os bósons W^+ , W^- e Z^0 à interação fraca. O bóson de Higgs possui uma função diferente das demais partículas, pois está relacionado ao campo de Higgs, responsável pelo mecanismo que confere massa a muitas partículas elementares. Embora seja comum dizer que os bósons transportam ou mediam as forças da natureza, essa é uma maneira simplificada de explicar fenômenos que, em sua descrição mais completa, são estudados pela Teoria Quântica de Campos.

Os fenômenos físicos são tradicionalmente organizados em quatro interações fundamentais: gravitacional, eletromagnética, forte e fraca. A interação eletromagnética atua sobre partículas carregadas e é mediada pelo fóton. A interação forte mantém quarks confinados nos hádrons e, de forma residual, contribui para a coesão nuclear. A interação fraca participa de processos como o decaimento beta e as reações nucleares estelares. A gravitação domina sistemas macroscópicos e astronômicos, embora seja extremamente fraca na escala subatômica.

A comparação entre essas interações permite integrar diferentes áreas da Física. A gravitação relaciona-se à Mecânica e à Astronomia; o eletromagnetismo conecta-se a circuitos, ondas e óptica; a interação forte conduz à estrutura nuclear e

Tabela 1 – Síntese das interações fundamentais da natureza.

Interação	Mediador	Alcance aproximado	Exemplos de atuação
Gravitacional	Não incorporado ao Modelo Padrão	Infinito	Movimento planetário, estrelas e estrutura cosmológica
Eletromagnética	Fóton	Infinito	Luz, eletricidade, magnetismo e ligações atômicas
Forte	Glúons	Escala subnuclear	Confinamento de quarks e estrutura dos hádrons
Fraca	W^+ , W^- e Z^0	Muito curto	Dcaimento beta e processos envolvendo neutrinos

Fonte: Elaborado pelo autor, (2026);

à composição dos hádrons; e a interação fraca permite compreender radioatividade, decaimentos e processos estelares. O Modelo Padrão pode, assim, funcionar como eixo de síntese de conhecimentos previamente estudados e como ponto de passagem para uma compreensão mais atual da matéria.

2.2 FUNDAMENTOS FÍSICOS DO MODELO PADRÃO

A Equação de Dirac constitui um marco na compatibilização entre Mecânica Quântica e Relatividade Especial ¹⁶. A equação de Schrödinger descreve adequadamente sistemas não relativísticos, mas trata tempo e espaço de maneira assimétrica. A Relatividade Especial exige que energia e momento satisfaçam a relação

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4. \quad (2.5)$$

Dirac procurou construir uma equação de primeira ordem no tempo e no espaço cuja aplicação sucessiva reproduzisse essa relação. Na forma hamiltoniana,

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = (c\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{p} + \beta mc^2) \psi, \quad (2.6)$$

em que α e β devem satisfazer relações de anticomutação:

$$\alpha_i \alpha_j + \alpha_j \alpha_i = 2\delta_{ij} I, \quad (2.7)$$

$$\alpha_i \beta + \beta \alpha_i = 0, \quad (2.8)$$

$$\beta^2 = I. \quad (2.9)$$

Na formulação covariante,

$$(i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu - mc) \psi = 0, \quad (2.10)$$

com

$$\gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu = 2g^{\mu\nu} I. \quad (2.11)$$

A função ψ é chamada de espinor, um tipo especial de função matemática utilizada para descrever partículas de spin $1/2$, como o elétron. Enquanto uma função comum pode ser representada por um único valor, um espinor é formado por um conjunto de componentes que reúne todas as informações necessárias para descrever o estado quântico e o comportamento relativístico da partícula.

A Equação de Dirac também admite soluções com energias positivas e negativas. A interpretação dessas soluções levou à previsão da existência das antipartículas e, em 1932, Carl Anderson confirmou experimentalmente essa ideia ao descobrir o pósitron, a antipartícula do elétron¹⁷⁻²⁰. Esse resultado tornou-se um marco da Física moderna, pois mostrou que uma teoria matemática bem fundamentada pode prever a existência de novas partículas antes mesmo de elas serem observadas em experimentos.

A Mecânica Quântica não relativística trabalha, em geral, com número fixo de partículas. Em processos de altas energias, entretanto, partículas podem ser criadas e destruídas. A Teoria Quântica de Campos fornece o arcabouço adequado para essa descrição, pois considera os campos como entidades fundamentais e as partículas como excitações quantizadas desses campos. O elétron corresponde a uma excitação do campo eletrônico; o fóton, do campo eletromagnético; e o bóson de Higgs, do campo de Higgs.

De forma esquemática, a dinâmica é organizada por uma densidade lagrangiana,

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{campos livres}} + \mathcal{L}_{\text{interaes}}. \quad (2.12)$$

As simetrias da lagrangiana restringem as interações possíveis e estão associadas às leis de conservação da Física. No Modelo Padrão, essas simetrias são representadas pelo grupo de calibre

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y, \quad (2.13)$$

em que cada fator está relacionado a uma das interações fundamentais da natureza. O grupo $SU(3)_C$ descreve a **interação forte**, responsável por manter os quarks unidos no interior dos prótons e dos nêutrons. O índice C refere-se à **carga de cor** (*color*), uma propriedade quântica exclusiva dos quarks e dos glúons.

O grupo $SU(2)_L$ está associado à **interação fraca**, responsável por fenômenos como o decaimento beta. O índice L indica que essa interação atua apenas sobre partículas de **quiralidade esquerda**. A quiralidade é uma propriedade quântica que distingue partículas que se comportam como "canhotas" ou "destras" do ponto de vista das simetrias da teoria.

O grupo $U(1)_Y$ está associado à **hipercarga fraca**, representada por Y . Essa grandeza, juntamente com o isospin fraco, determina a carga elétrica das partículas por meio da relação de Gell-Mann–Nishijima,

$$Q = T_3 + \frac{Y}{2}. \quad (2.14)$$

Nessa expressão, Q representa a carga elétrica da partícula, T_3 é a terceira componente do isospin fraco e Y corresponde à hipercarga fraca. Após a quebra espontânea da simetria eletrofraca pelo mecanismo de Higgs, as simetrias $SU(2)_L$ e $U(1)_Y$ dão origem às interações eletromagnética e fraca observadas experimentalmente^{21–23}. Dessa forma, a estrutura da Eq.(2.13) reúne, em um único formalismo matemático, as partículas de matéria, os bósons mediadores e as regras que governam suas interações, respeitando as simetrias fundamentais da teoria.

Tabela 2 – Significado físico dos grupos de simetria do Modelo Padrão.

Grupo	Significado físico
$SU(3)_C$	Interação forte (carga de cor dos quarks)
$SU(2)_L$	Interação fraca (quiralidade esquerda)
$U(1)_Y$	Hipercarga fraca (Y)

Fonte: Elaborado pelo autor, (2026);

A Cromodinâmica Quântica (QCD) é a teoria que explica como a interação forte mantém os quarks unidos para formar partículas como prótons e nêutrons. Essa interação é transmitida pelos glúons, que possuem uma propriedade chamada carga de cor. Diferentemente do fóton, os glúons também podem interagir entre si, tornando a interação forte bastante diferente da interação eletromagnética.

A QCD prevê que, quando os quarks estão muito próximos, a força entre eles se torna mais fraca, fenômeno conhecido como liberdade assintótica. No entanto, quando se tenta separá-los, a força aumenta rapidamente, impedindo que um quark exista sozinho. Esse comportamento recebe o nome de confinamento. Por isso, os quarks nunca são observados isoladamente, mas sempre fazendo parte de partículas compostas, como prótons e nêutrons, ou por meio dos vestígios deixados nas colisões produzidas em aceleradores de partículas.

Na teoria eletrofraca, o mecanismo de Higgs explica como algumas partículas elementares adquirem massa sem violar as simetrias fundamentais da teoria. Esse mecanismo é descrito por um campo denominado **campo de Higgs**, presente em todo o Universo. O comportamento desse campo é determinado pelo potencial

$$V(\Phi) = \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2, \quad (2.15)$$

em que $V(\Phi)$ representa a energia potencial do campo de Higgs. O símbolo Φ representa o próprio campo de Higgs, enquanto $\Phi^\dagger$ é o seu conjugado hermitiano. O

parâmetro μ^2 determina a forma do potencial e é responsável pela quebra espontânea de simetria quando assume valor negativo. Já o parâmetro λ controla a intensidade da autointeração do campo e garante que o potencial permaneça estável.

Quando o campo de Higgs atinge o estado de menor energia, denominado **estado fundamental**, a simetria da teoria é espontaneamente quebrada. Como consequência, os bósons W^+ , W^- e Z^0 passam a possuir massa, enquanto o fóton permanece sem massa. Pequenas oscilações do campo em torno desse estado de equilíbrio correspondem ao **bóson de Higgs**, observado experimentalmente.

É importante destacar que o mecanismo de Higgs não é responsável por toda a massa existente na natureza. A maior parte da massa dos prótons e dos nêutrons resulta da energia da interação forte que mantém os quarks confinados em seu interior. O mecanismo de Higgs está associado às massas das partículas elementares, como elétrons, quarks e bósons vetoriais, por meio de interações específicas entre essas partículas e o campo de Higgs.

Em 2012, os experimentos ATLAS e CMS, realizados no Grande Colisor de Hádrons (LHC), anunciaram a descoberta de uma nova partícula compatível com o bóson de Higgs, confirmando uma das previsões mais importantes do Modelo Padrão ^{25,26}.

Tabela 3 – Significado dos termos do potencial de Higgs.

Símbolo	Significado
$V(\Phi)$	Energia potencial do campo de Higgs
Φ	Campo de Higgs
$\Phi^\dagger$	Conjugado hermitiano do campo de Higgs
μ^2	Parâmetro que determina a quebra espontânea de simetria
λ	Intensidade da autointeração do campo de Higgs

Fonte: Elaborado pelo autor, (2026);

O Modelo Padrão é a teoria que reúne todas as partículas elementares conhecidas e descreve três das quatro interações fundamentais da natureza: a interação forte, a interação fraca e a interação eletromagnética. Para organizar matematicamente essas partículas e suas interações, a teoria utiliza uma função denominada **lagrangiana**, que reúne todas as informações necessárias para descrever o comportamento do sistema físico. De forma esquemática, a lagrangiana do Modelo Padrão pode ser escrita como

$$\mathcal{L}_{\text{MP}} = \mathcal{L}_{\text{calibre}} + \mathcal{L}_{\text{fmrions}} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}} + \mathcal{L}_{\text{Yukawa}}. \quad (2.16)$$

Nessa expressão, $\mathcal{L}_{\text{MP}}$ representa a lagrangiana completa do Modelo Padrão. O termo $\mathcal{L}_{\text{calibre}}$ descreve os bósons mediadores das interações fundamentais, como

o fóton, os glúons e os bósons $W^\pm$ e Z^0 . O termo $\mathcal{L}_{\text{fermions}}$ descreve o comportamento dos quarks e dos léptons, que constituem toda a matéria conhecida. O termo $\mathcal{L}_{\text{Higgs}}$ representa o campo de Higgs e sua dinâmica, enquanto $\mathcal{L}_{\text{Yukawa}}$ descreve as interações entre o campo de Higgs e os férmions, permitindo que essas partículas adquiram massa após a quebra espontânea da simetria eletrofraca.

Embora essa expressão seja uma representação simplificada da teoria, ela mostra que o Modelo Padrão é muito mais do que uma tabela contendo partículas elementares. Trata-se de uma teoria matemática que organiza as partículas, os campos e suas interações em um único formalismo, fundamentado nos princípios de simetria e nas leis fundamentais da Física.

O sucesso do Modelo Padrão decorre de sua capacidade de explicar e prever ampla variedade de fenômenos. Entre suas confirmações estão a descoberta das correntes neutras, dos bósons W e Z , do quark top e do bóson de Higgs. Além disso, suas previsões para processos eletromagnéticos e eletrofracos apresentam elevada precisão. O acordo entre resultados teóricos e observações experimentais torna essa teoria um dos empreendimentos mais bem-sucedidos da Física contemporânea.

Esse êxito não significa, entretanto, que a teoria seja completa. O Modelo Padrão não inclui a gravitação, não identifica a natureza da matéria escura e não explica satisfatoriamente a assimetria cosmológica entre matéria e antimatéria. A existência de massas e oscilações de neutrinos também exige extensões em relação à formulação mínima. Permanecem abertas, ainda, questões sobre a origem das três gerações e os valores das massas e dos acoplamentos.

Essas limitações possuem valor científico e pedagógico porque mostram que a ciência não constitui um corpo acabado de respostas. O Modelo Padrão é uma teoria extremamente bem-sucedida, mas convive com problemas ainda não resolvidos. Essa combinação permite discutir alcance, evidência, provisoriedade, limites explicativos e abertura da investigação científica, aproximando o ensino não apenas dos resultados consolidados, mas também das fronteiras do conhecimento.

2.3 O ENSINO DA FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA

A inserção da Física Moderna e Contemporânea na Educação Básica é defendida como forma de atualizar o currículo e aproximar os estudantes da ciência produzida nos séculos XX e XXI^{34,35}. Apesar disso, muitos materiais escolares ainda concentram a maior parte do conteúdo na Física Clássica. O problema não consiste em abandonar os temas tradicionais, indispensáveis à formação básica, mas em criar articulações que revelem sua continuidade com os conhecimentos contemporâneos.

O Modelo Padrão pode ser relacionado a conteúdos já presentes no Ensino Médio. Os modelos atômicos introduzem a ideia de estrutura interna da matéria; a eletricidade permite discutir carga e interação eletromagnética; a radioatividade

aproxima o estudante da interação fraca; a Física Nuclear conduz à composição de prótons e nêutrons; a equivalência entre massa e energia contribui para interpretar criação, aniquilação e decaimento de partículas; e a óptica estabelece a conexão entre luz e fótons. Essas aproximações mostram que a abordagem da Física de Partículas não precisa surgir como um bloco isolado, mas pode desenvolver-se a partir de conceitos já estudados.

A abordagem histórica também favorece a compreensão da natureza da ciência. A passagem de Dalton a Thomson, Rutherford, Bohr e à Mecânica Quântica mostra que teorias são construídas, testadas e reformuladas. A previsão do pósitron pela Equação de Dirac e a descoberta do Higgs evidenciam a relação entre formulação teórica, desenvolvimento tecnológico e validação experimental. Ao acompanhar esse percurso, o estudante pode compreender que a ciência não avança apenas por observação direta, mas também pela elaboração de modelos, pela produção de instrumentos e pelo confronto entre previsões e resultados.

A Base Nacional Comum Curricular orienta o Ensino Médio para a análise de fenômenos, o uso de modelos, a argumentação baseada em evidências e a compreensão das relações entre ciência, tecnologia e sociedade³. Embora a BNCC não trate explicitamente do Modelo Padrão nem estabeleça uma sequência de conteúdos sobre Física de Partículas, as competências e habilidades previstas para o Ensino Médio permitem que esses temas sejam explorados de forma contextualizada. Nesse sentido, o professor pode abordar conceitos relacionados à estrutura da matéria, às interações fundamentais da natureza, às tecnologias utilizadas na detecção de partículas e aos avanços da Física contemporânea.

Uma abordagem escolar adequada deve evitar tanto o formalismo excessivo quanto a simplificação que reduz o tema à memorização de nomes e símbolos. O objetivo não é reproduzir um curso universitário, mas selecionar ideias estruturantes: a diferença entre partículas elementares e compostas, a organização em quarks e léptons, o papel dos bósons, a existência da antimatéria, as relações entre campos e partículas e os limites do Modelo Padrão. Essa seleção permite conservar a coerência conceitual sem exigir o domínio matemático da Teoria Quântica de Campos.

A presença desses temas no Ensino Médio também pode contribuir para ampliar a alfabetização científica. Conceitos como evidência, modelo, previsão, incerteza e limite explicativo ganham significado concreto quando associados à história das partículas elementares. Além disso, a discussão sobre grandes aceleradores, detectores, produção de radioisótopos, tecnologias médicas e colaboração científica internacional favorece relações entre conhecimento científico, desenvolvimento tecnológico e organização social da pesquisa³⁵⁻³⁸.

Nesse contexto, o ensino da Física Moderna e Contemporânea não deve ser entendido como uma simples atualização da lista de conteúdos escolares. Sua impor-

tância reside na possibilidade de apresentar uma visão mais atual da ciência, aproximar os estudantes das pesquisas desenvolvidas na Física contemporânea e estabelecer conexões entre os conhecimentos ensinados na escola e aqueles produzidos pela comunidade científica ^{35,38,41}.

Essa aproximação exige, entretanto, escolhas pedagógicas que considerem a complexidade dos conceitos, os conhecimentos prévios dos estudantes e as condições concretas do trabalho docente ^{1,2,4}.

2.4 FUNDAMENTOS PEDAGÓGICOS E MEDIAÇÃO DOCENTE

A transposição didática refere-se ao processo de transformação do conhecimento científico em conhecimento ensinável ¹. Essa transformação não consiste em mera redução textual. Exige selecionar conceitos, reorganizar a sequência, adaptar a linguagem, escolher representações e preservar relações fundamentais. No caso da Física de Partículas, a transposição deve evitar equívocos recorrentes, como tratar partículas como pequenas esferas clássicas, identificar “cor” com cor visível ou afirmar que o Higgs responde por toda a massa da matéria.

A recontextualização deve considerar os conhecimentos prévios dos estudantes. Segundo a teoria da aprendizagem significativa, novas informações são aprendidas de modo mais consistente quando se relacionam, de maneira não arbitrária, a conceitos já presentes na estrutura cognitiva ^{2,4}. Estrutura atômica, carga elétrica, núcleo, radioatividade e conservação de energia podem atuar como pontos de ancoragem para a introdução do Modelo Padrão.

Uma progressão conceitual adequada pode partir da hierarquia da matéria, distinguir partículas compostas e elementares, classificar férmions e bósons e, posteriormente, relacioná-los às interações fundamentais. A reconciliação integrativa ocorre quando se explicita que o elétron dos modelos atômicos é o mesmo lépton do Modelo Padrão; o fóton associado à luz é o quantum do campo eletromagnético; e o decaimento beta envolve a interação fraca. Essas relações permitem que o conteúdo contemporâneo amplie, em vez de substituir, os conhecimentos anteriormente construídos.

Materiais didáticos, entretanto, não determinam a aprendizagem. Sua contribuição depende dos objetivos, das atividades propostas e da mediação docente ⁵⁰. Imagens, tabelas e diagramas são particularmente úteis em temas sem observação direta, mas precisam ser acompanhados de leitura crítica. O professor deve esclarecer o caráter representacional das figuras, discutir o que cada modelo evidencia ou omite e evitar que elementos visuais sejam interpretados como reproduções literais da realidade microscópica.

A mediação docente também é necessária para equilibrar precisão e acessibilidade. Uma linguagem excessivamente técnica pode dificultar a compreensão, enquanto

simplificações inadequadas podem produzir concepções equivocadas. O papel do professor consiste em construir pontes entre os conceitos de referência, os conhecimentos prévios dos estudantes e as finalidades formativas do Ensino Médio. Nesse processo, perguntas orientadoras, comparações, analogias controladas e retomadas conceituais podem contribuir para uma leitura mais crítica do conteúdo.

O livreto elaborado nesta pesquisa pode apoiar diferentes estratégias didáticas, como leitura orientada, comparação entre partículas compostas e elementares, construção de tabelas de cargas, análise introdutória de decaimentos, elaboração de mapas conceituais, debates sobre os limites do Modelo Padrão e produção de textos de divulgação científica. Essas possibilidades não constituem uma sequência obrigatória, mas exemplos de utilização que podem ser adaptados aos objetivos, ao tempo disponível e ao perfil da turma.

A avaliação deve privilegiar compreensão e articulação conceitual, evitando restringir-se à memorização de nomes, símbolos e classificações. Questões que solicitem ao estudante explicar por que prótons e nêutrons não são elementares, comparar quarks e léptons, relacionar bósons às interações fundamentais ou discutir limites do Modelo Padrão permitem verificar formas mais elaboradas de aprendizagem. Atividades de síntese, produção textual e construção de representações também podem favorecer a integração entre conceitos.

A utilização do livreto pode contribuir ainda para a formação científica ao apresentar a ciência como processo histórico, coletivo e aberto. O estudo das partículas elementares permite discutir a relação entre teoria e experimento, o papel dos modelos, a necessidade de grandes colaborações e a permanência de questões não resolvidas. Essas dimensões ampliam o conteúdo para além da descrição de partículas e aproximam o ensino de uma compreensão mais crítica da produção do conhecimento.

O produto educacional elaborado nesta pesquisa assume a forma de um livreto ilustrado sobre partículas elementares. Sua organização parte da evolução dos modelos de matéria, avança para a distinção entre partículas compostas e elementares, apresenta as interações fundamentais e culmina na estrutura do Modelo Padrão, incluindo antimatéria e bóson de Higgs.

O livreto procura atender simultaneamente a duas exigências. A primeira é científica: preservar a coerência conceitual da Física de Partículas, evitando classificar prótons e nêutrons como elementares, atribuir toda a massa ao Higgs ou incluir a gravitação entre as interações descritas pelo Modelo Padrão. A segunda é pedagógica: apresentar os conteúdos em linguagem acessível e em formato útil ao planejamento docente.

O material não pretende substituir o livro didático nem oferecer um curso completo de Teoria Quântica de Campos. Sua função é atuar como apoio, introdução conceitual e recurso de organização visual. Pode ser utilizado como organizador prévio,

fonte de consulta durante as aulas ou instrumento de síntese e avaliação. Seu formato favorece a comparação entre quarks, léptons e bósons, mas essa classificação deve sempre ser relacionada às interações, aos campos e à composição da matéria.

Como o produto não foi aplicado em sala de aula no escopo desta pesquisa, não se afirmam resultados empíricos sobre aprendizagem, motivação ou desempenho. Suas contribuições são discutidas em termos de potencialidade pedagógica, coerência teórica, clareza visual e alinhamento com objetivos de formação científica. Estudos posteriores poderão investigar sua recepção por professores e estudantes e sua funcionalidade em diferentes sequências de ensino.

A evolução das ideias sobre a matéria demonstra que a Física se desenvolve por meio da construção e revisão de modelos. O átomo indivisível de Dalton foi substituído por estruturas com elétrons e núcleo; prótons e nêutrons revelaram-se compostos por quarks; e a concepção contemporânea de partícula passou a ser formulada no contexto da Teoria Quântica de Campos. A Equação de Dirac articulou Mecânica Quântica e Relatividade Especial, incorporando o spin e conduzindo à previsão da antimatéria. O Modelo Padrão organizou férmions, bósons de calibre e o setor de Higgs sob a simetria

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y.$$

Seu sucesso experimental convive com limitações associadas à gravitação, à matéria escura, às massas dos neutrinos e à assimetria entre matéria e antimatéria. No Ensino Médio, esses conteúdos devem ser tratados por meio de conceitos, relações históricas, evidências e modelos, sem reproduzir o formalismo universitário. Nesse contexto, o livreto ilustrado pode atuar como instrumento de mediação e atualização curricular, desde que integrado à ação docente e a atividades que promovam comparação, argumentação e compreensão.

A fundamentação apresentada neste capítulo sustenta, portanto, tanto a seleção dos conteúdos científicos quanto as escolhas pedagógicas realizadas na elaboração do produto educacional. O capítulo seguinte descreve o percurso metodológico da pesquisa, os critérios utilizados na constituição do corpus e as etapas de desenvolvimento do livreto.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve o percurso metodológico adotado na pesquisa e na elaboração do produto educacional intitulado *Livreto Didático do Modelo Padrão das Partículas Elementares*. O trabalho foi desenvolvido a partir da articulação entre três dimensões complementares: a consistência científica dos conteúdos de Física de Partículas, sua adequação didático-pedagógica ao Ensino Médio e a organização textual e visual do material. Essa articulação orientou tanto a seleção dos referenciais teóricos quanto as decisões relacionadas ao recorte temático, à linguagem, à sequência de apresentação dos conceitos e às possibilidades de utilização do livreto em contextos escolares.

A investigação não envolveu intervenção sistemática em sala de aula, coleta de dados com estudantes ou professores, aplicação de questionários, realização de entrevistas ou mensuração de aprendizagem. Seu propósito consistiu em desenvolver, fundamentar e analisar teoricamente um recurso didático destinado à inserção de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea na Educação Básica. Os procedimentos metodológicos concentraram-se, portanto, no levantamento bibliográfico e documental, na constituição do corpus, na seleção e reorganização dos conteúdos, na transposição didática dos conhecimentos científicos, na elaboração do livreto e na análise de sua coerência interna e de suas potencialidades pedagógicas.

3.1 CARACTERIZAÇÃO, DELIMITAÇÃO E CONSTITUIÇÃO DO CORPUS

Quanto à abordagem, esta pesquisa caracteriza-se como qualitativa, uma vez que se concentra na interpretação de fundamentos científicos, históricos e pedagógicos relacionados ao ensino do Modelo Padrão das Partículas Elementares. A abordagem qualitativa mostrou-se adequada porque as decisões centrais do trabalho envolveram análise de conceitos, seleção de conteúdos, definição do nível de aprofundamento, adequação da linguagem e avaliação das formas de representação do conhecimento, aspectos que não se reduzem à quantificação de dados ⁴⁷.

Quanto aos procedimentos, a investigação apresenta natureza bibliográfica e documental. A pesquisa bibliográfica foi realizada em livros, artigos científicos, dissertações, teses e trabalhos acadêmicos relacionados à estrutura da matéria, à Física de Partículas, ao Modelo Padrão, à Física Moderna e Contemporânea e ao Ensino de Física. Esse levantamento permitiu reunir os fundamentos necessários à construção científica e pedagógica do produto educacional ^{48, 49}. A pesquisa documental concentrou-se em documentos normativos da Educação Básica, especialmente a Base Nacional Comum Curricular, utilizada como referência para relacionar o material às

competências e habilidades da área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias³.

A pesquisa também possui caráter exploratório, pois investiga possibilidades de abordagem escolar de um tema ainda pouco presente no currículo praticado em muitas instituições de Ensino Médio, e natureza aplicada, uma vez que resulta na produção de um recurso destinado a apoiar uma situação concreta de ensino⁴⁸. O caráter aplicado não implica, neste trabalho, comprovação empírica da eficácia do livreto, mas indica que a investigação foi orientada à construção de um produto educacional fundamentado e potencialmente utilizável por professores.

O objeto de estudo foi delimitado à elaboração de um livreto didático sobre o Modelo Padrão das Partículas Elementares, destinado prioritariamente ao Ensino Médio. O material contempla a evolução das concepções sobre a matéria, a distinção entre partículas elementares e compostas, a organização dos férmions em quarks e léptons, os bósons mediadores, as interações fundamentais, a antimatéria, o campo de Higgs e alguns dos limites do Modelo Padrão. Esses conteúdos foram abordados em perspectiva conceitual, histórica e qualitativa, preservando-se as relações essenciais entre partículas, campos e interações.

Não integrou o escopo da pesquisa o desenvolvimento completo do formalismo da Teoria Quântica de Campos, das teorias de calibre ou das representações matemáticas associadas aos grupos de simetria. Embora esses elementos sejam fundamentais na formulação avançada do Modelo Padrão, sua apresentação integral exigiria conhecimentos matemáticos e físicos que ultrapassem os objetivos da Educação Básica e a finalidade do produto elaborado. Essa delimitação não significou abandono do rigor científico, mas a adoção de um recorte compatível com o público-alvo, evitando simplificações capazes de produzir interpretações incorretas.

O corpus da pesquisa foi constituído por duas categorias principais de fontes. A primeira reuniu referências científicas sobre a estrutura da matéria, a Equação de Dirac, a Teoria Quântica de Campos, as partículas elementares, as interações fundamentais e a organização do Modelo Padrão. Foram priorizadas obras reconhecidas na formação universitária em Física, artigos de relevância histórica, trabalhos acadêmicos e materiais produzidos por instituições científicas. A segunda categoria reuniu estudos relacionados ao Ensino de Física, à transposição didática, à aprendizagem significativa, à contextualização, ao uso de recursos visuais, à inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio e à elaboração de produtos educacionais.

A seleção das fontes considerou sua pertinência ao tema, confiabilidade científica ou institucional, contribuição para a compreensão do Modelo Padrão, relevância pedagógica, adequação ao nível de aprofundamento pretendido e possibilidade de articulação com os objetivos do Ensino Médio. As informações obtidas foram confrontadas e reorganizadas, distinguindo-se os conteúdos considerados essenciais daqueles cujo grau de especialização os tornava inadequados ao público-alvo. Na análise da BNCC,

foram observados elementos relacionados à investigação científica, ao uso de modelos, à argumentação baseada em evidências, à comunicação em diferentes linguagens e à compreensão da ciência como construção histórica, coletiva e social³.

3.2 FUNDAMENTOS E PROCEDIMENTOS DA ELABORAÇÃO DO PRODUTO

A elaboração do livreto foi orientada pelos princípios da transposição didática e da aprendizagem significativa. A transposição didática compreende o processo de transformação do conhecimento científico em conhecimento organizado para fins de ensino, envolvendo seleção, reordenação, contextualização, adaptação da linguagem e redefinição das formas de apresentação¹. Esse processo não corresponde a uma simples redução do conteúdo original, pois exige decisões sobre o que deve ser preservado, quais relações conceituais precisam ser explicitadas e quais representações são adequadas ao público a que o material se destina.

No desenvolvimento do livreto didático, a transposição didática teve como objetivo transformar o conhecimento científico produzido pela Física de Partículas em um conhecimento adequado ao contexto do Ensino Médio. Para isso, foram preservados os conceitos fundamentais do Modelo Padrão, mas sua apresentação foi reorganizada em uma linguagem mais acessível e acompanhada de exemplos, ilustrações e explicações compatíveis com o nível de formação dos estudantes.

Foram mantidas a distinção entre partículas elementares e compostas, a classificação em férmions e bósons, as cargas fundamentais, a relação entre partículas e interações, o papel dos bósons mediadores, a função do campo de Higgs e os limites explicativos da teoria.

A aprendizagem significativa orientou a articulação entre os novos conteúdos e conhecimentos que os estudantes já podem possuir, como átomo, núcleo, próton, nêutron, elétron, carga elétrica, massa, energia e radioatividade^{2,4}. A estrutura do livreto foi concebida de modo a partir desses conceitos e ampliar progressivamente a descrição da matéria, estabelecendo conexões entre os modelos atômicos, a estrutura nuclear, a composição dos hádrons e a classificação das partículas elementares.

Esses referenciais permitiram tratar o livreto como instrumento de mediação pedagógica, e não como simples compilação de informações. O produto foi concebido para apoiar o trabalho docente, permanecendo o professor responsável por problematizar os conteúdos, estabelecer relações com os conhecimentos prévios dos estudantes, selecionar atividades e adequar o uso do material às condições concretas da turma. Dessa forma, as escolhas metodológicas procuraram preservar o caráter complementar do livreto em relação ao livro didático, às explicações do professor e a outros recursos educacionais.

O desenvolvimento do produto ocorreu por meio de etapas articuladas. Inicialmente, foram definidos o público-alvo, os objetivos formativos e o nível de aprofunda-

mento conceitual. Em seguida, realizou-se o levantamento bibliográfico e documental e foram selecionados os conteúdos considerados essenciais à compreensão introdutória do Modelo Padrão: evolução dos modelos atômicos, partículas elementares e compostas, bósons mediadores, interações fundamentais, antimatéria, mecanismo de Higgs e questões ainda não resolvidas pela teoria.

Após a seleção dos conteúdos, eles foram organizados em uma sequência didática que acompanha a evolução histórica do conhecimento sobre a constituição da matéria. O livreto inicia com os primeiros modelos atômicos, apresenta a descoberta das partículas subatômicas e a classificação das partículas elementares, introduz as interações fundamentais da natureza e culmina na apresentação do Modelo Padrão e de seus limites.

Em toda a obra, a linguagem foi adaptada ao Ensino Médio, utilizando textos objetivos, ilustrações e explicações acessíveis. Essa organização permitiu que os conceitos fossem apresentados de forma gradual, estabelecendo relações entre os diferentes temas e conduzindo o estudante da compreensão da estrutura da matéria às principais ideias da Física de Partículas contemporânea.

Na etapa seguinte, foram produzidos os textos explicativos, tabelas, linhas do tempo, esquemas e ilustrações. Os recursos visuais foram incorporados quando contribuíam para classificar informações, comparar propriedades, organizar relações ou representar sequências históricas. As imagens receberam identidade visual própria, mas não foram tratadas como substitutas das explicações conceituais. Sua função consistiu em favorecer a organização e a leitura do conteúdo, mantendo-se explícito o caráter representacional de toda ilustração da realidade microscópica.

Após a elaboração da primeira versão, o livreto passou por uma revisão científica, pedagógica, textual e visual. Foram verificadas a consistência das informações com a literatura consultada, a adequação da linguagem ao Ensino Médio, a padronização da terminologia, a coesão textual e a organização visual do material. As correções identificadas foram incorporadas à versão final, preparada para distribuição em formato digital e impressão. Ressalta-se que esse processo correspondeu a uma revisão do material, fundamentada na literatura científica e nos objetivos pedagógicos estabelecidos para o produto educacional, não envolvendo, nesta etapa, procedimentos de validação com professores ou estudantes.

Como recurso de apoio à elaboração do trabalho e do produto educacional, foram utilizadas ferramentas de Inteligência Artificial (IA) de forma complementar e supervisionada. Seu emprego restringiu-se ao auxílio na revisão gramatical e linguística de trechos do texto e à elaboração de algumas figuras utilizadas no livreto. As informações científicas, as escolhas conceituais, a organização didático-pedagógica, a análise do conteúdo e a versão final do material permaneceram sob responsabilidade dos autores, sendo os conteúdos produzidos ou modificados com auxílio de IA submetidos

à revisão humana antes de sua incorporação ao trabalho.

3.3 CRITÉRIOS DE ANÁLISE E POTENCIALIDADES PEDAGÓGICAS

A análise do produto educacional foi realizada com base em cinco critérios: consistência científica, adequação didática, coerência interna, qualidade comunicacional e potencial de utilização pedagógica. Esses critérios não foram empregados como instrumentos de validação empírica, mas como dimensões de análise teórico-metodológica do material desenvolvido.

A consistência científica corresponde à correção dos conceitos, das classificações e das relações apresentadas, bem como à compatibilidade das informações com a literatura especializada. Esse critério incluiu a verificação da distinção entre partículas elementares e compostas, da organização das famílias de férmions, da identificação dos bósons mediadores e da delimitação das interações contempladas pelo Modelo Padrão.

A adequação didática considerou o público-alvo, o nível de formalização, a clareza da linguagem e a necessidade de mediação docente. Buscou-se verificar se o conteúdo poderia ser compreendido em uma abordagem introdutória sem que sua adaptação produzisse distorções conceituais. A coerência interna, por sua vez, envolveu a articulação entre as partes do livreto, a continuidade da sequência temática e a uniformidade da terminologia utilizada.

A qualidade comunicacional foi analisada em relação à clareza dos textos, legibilidade, organização visual, identificação das informações e equilíbrio entre linguagem verbal e recursos gráficos. O potencial pedagógico foi considerado a partir das possibilidades de uso do livreto em aulas expositivas dialogadas, leituras orientadas, elaboração de mapas conceituais, atividades de classificação, debates sobre a história e os limites da ciência, trabalhos de pesquisa e ações de divulgação científica.

O livreto pode ser utilizado de forma integral ou modular. Entre suas possibilidades de emprego estão a discussão histórica dos modelos da matéria, a distinção entre partículas elementares e compostas, o estudo das famílias de partículas e a introdução de temas como aceleradores, detectores, antimatéria, neutrinos e bóson de Higgs. O material também pode apoiar atividades em grupo, produção de sínteses, elaboração de quadros comparativos e articulação com vídeos, simulações e textos de divulgação científica.

Essas possibilidades não constituem uma sequência didática obrigatória nem garantem, por si mesmas, resultados de aprendizagem. Sua utilização deve ser adaptada à carga horária, às condições da escola, aos objetivos do professor e aos conhecimentos prévios dos estudantes. O produto não foi concebido para substituir a mediação docente ou o livro didático, mas para ampliar as alternativas de abordagem da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio.

A pesquisa não envolveu coleta de dados com seres humanos, aplicação de questionários, realização de entrevistas, observação de aulas ou identificação de participantes. Foram observados os princípios de integridade acadêmica, com indicação das fontes consultadas e respeito à autoria das ideias, imagens e informações utilizadas. Uma eventual aplicação futura do livreto em pesquisa envolvendo estudantes ou professores deverá observar as normas institucionais e éticas correspondentes.

A principal limitação metodológica decorre da ausência de aplicação sistemática do produto em contexto escolar. Em razão dessa delimitação, não é possível afirmar empiricamente que o livreto produz ganhos de aprendizagem, aumenta a motivação dos estudantes ou modifica sua percepção sobre a Física. As conclusões da pesquisa referem-se à coerência teórico-metodológica do material, à adequação de sua organização e às suas potencialidades pedagógicas, e não à comprovação experimental de sua eficácia.

Outra limitação relaciona-se à amplitude e à complexidade do Modelo Padrão. A adequação do conteúdo ao Ensino Médio exigiu recortes conceituais seleção de exemplos. Embora essas decisões tenham sido orientadas pela literatura e pelo cuidado com a precisão científica, todo processo de transposição didática envolve escolhas que destacam determinados aspectos e deixam outros em segundo plano.

A contribuição de qualquer recurso didático também depende das condições de utilização. O livreto não possui função autônoma, pois seus resultados educacionais dependem da mediação docente, da articulação com os conhecimentos prévios dos estudantes, das atividades propostas e de sua integração com outras estratégias de ensino. Por essa razão, o material deve ser compreendido como recurso de apoio e não como solução isolada para os desafios relacionados à inserção da Física Moderna e Contemporânea na Educação Básica.

Essas limitações delimitam o alcance do trabalho e, simultaneamente, indicam possibilidades de continuidade. Estudos posteriores poderão submeter o livreto à apreciação de professores, aplicá-lo em turmas do Ensino Médio, analisar sua recepção e investigar os processos de aprendizagem associados a diferentes formas de utilização. Essas etapas poderão fornecer evidências empíricas para aperfeiçoar o produto e ampliar a compreensão de suas contribuições e restrições.

O percurso metodológico compreendeu, portanto, a delimitação do objeto e dos objetivos, o levantamento bibliográfico e documental, a constituição do corpus, a seleção dos conteúdos, sua transposição didática, a definição da estrutura textual e visual, a elaboração do livreto e a análise de sua coerência, de suas potencialidades e de suas limitações. A metodologia adotada buscou assegurar a articulação entre rigor científico, clareza didática e relevância educacional, preservando a compatibilidade entre o conteúdo de referência, as finalidades formativas do Ensino Médio e a natureza teórica da pesquisa.

O capítulo seguinte apresenta o produto educacional desenvolvido, descrevendo sua organização, seus componentes e as possibilidades pedagógicas associadas ao uso do *Livreto Didático do Modelo Padrão das Partículas Elementares*.

4 POTENCIALIDADES PEDAGÓGICAS DO PRODUTO EDUCACIONAL

O produto educacional elaborado nesta pesquisa consiste em um livreto didático sobre o Modelo Padrão das Partículas Elementares, concebido como recurso de apoio à inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Sua finalidade ultrapassa a apresentação de nomes, símbolos e propriedades das partículas elementares, pois o material procura organizar conhecimentos científicos complexos em uma estrutura visual, histórica e conceitualmente articulada, capaz de auxiliar o professor na mediação entre o conhecimento especializado da Física de Partículas e as finalidades formativas da Educação Básica.

A discussão desenvolvida neste capítulo não corresponde a uma avaliação empírica da aprendizagem produzida pelo livreto. O material não foi aplicado sistematicamente em uma turma nem submetido a procedimento formal de validação com professores ou estudantes. As considerações apresentadas constituem, portanto, uma análise teórico-pedagógica de suas possibilidades de utilização, fundamentada na estrutura do produto, nos referenciais adotados, na organização dos conteúdos e nos objetivos do Ensino de Física.

Essa delimitação é necessária para distinguir potencialidade pedagógica de efetividade comprovada. Um recurso pode apresentar coerência conceitual, clareza comunicacional e possibilidades relevantes de uso sem que, por isso, seja possível afirmar previamente quais resultados produzirá em situações concretas. Seus efeitos dependem do planejamento, da mediação docente, dos conhecimentos prévios dos estudantes, das condições materiais da escola, do tempo disponível e da articulação com outras estratégias didáticas. O livreto não é apresentado, assim, como solução autônoma para os desafios do ensino da Física de Partículas, mas como instrumento que pode contribuir para práticas mais atuais, contextualizadas e conceitualmente significativas.

4.1 DISPONIBILIZAÇÃO, ACESSIBILIDADE E DISSEMINAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

O produto educacional desenvolvido nesta pesquisa consiste em um livreto didático intitulado *Partículas Elementares: Guia Oficial do Tecido da Realidade*, elaborado com o propósito de contribuir para a inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Sua concepção fundamenta-se na articulação entre rigor científico, organização didática e comunicação visual, buscando apresentar os conceitos fundamentais do Modelo Padrão por meio de uma linguagem acessível, ilustrações, esquemas conceituais e recursos gráficos que favoreçam a compreensão da estrutura

da matéria e das interações fundamentais da natureza.

O livreto foi desenvolvido em formato digital (*Portable Document Format* – PDF), possibilitando sua utilização em diferentes dispositivos eletrônicos, como computadores, tablets e smartphones, sem prejuízo da qualidade gráfica. Além disso, o material poderá ser impresso em alta resolução, permitindo sua utilização em salas de aula, bibliotecas, laboratórios didáticos e atividades de divulgação científica.

Como estratégia para ampliar seu alcance social e educacional, pretende-se disponibilizar o livreto gratuitamente em plataformas digitais de acesso aberto, possibilitando que professores, licenciandos, estudantes e demais interessados realizem seu download sem custos. Entre os ambientes de disponibilização destacam-se o Repositório Institucional do Instituto Federal do Piauí, o Portal EduCAPES, repositórios de Recursos Educacionais Abertos (REA) e outros espaços institucionais destinados à divulgação de materiais didáticos produzidos no âmbito da pesquisa e da extensão.

A adoção do formato digital também favorece a atualização contínua do produto educacional. Novas versões poderão incorporar avanços científicos relacionados à Física de Partículas, melhorias na organização pedagógica, revisões textuais e sugestões oriundas de professores que venham a utilizar o material em diferentes contextos educacionais. Dessa forma, o livreto constitui um recurso dinâmico, passível de aperfeiçoamentos permanentes, mantendo sua relevância científica e pedagógica ao longo do tempo.

Embora o presente trabalho não contemple a aplicação do livreto em sala de aula, sua estrutura foi concebida para favorecer diferentes possibilidades de utilização pedagógica. O material pode ser empregado como recurso de apoio em aulas de Física, em atividades de divulgação científica, em feiras de ciências, em projetos de extensão, em clubes de ciências e em cursos de formação inicial e continuada de professores. Sua organização permite tanto a leitura sequencial quanto a consulta pontual de conteúdos específicos, ampliando sua versatilidade como material de apoio ao processo de ensino e aprendizagem.

A Figura 1 apresenta uma representação ilustrativa do produto educacional desenvolvido nesta pesquisa. A composição visual procura sintetizar a proposta do livreto, destacando seu caráter didático, sua identidade gráfica e sua finalidade de aproximar estudantes do universo da Física de Partículas por meio de uma linguagem contemporânea, acessível e cientificamente fundamentada.

Figura 1 – Representação ilustrativa do livreto didático *Partículas Elementares: Guia Oficial do Tecido da Realidade*



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

A Figura 2 apresenta o QR Code destinado ao acesso à versão digital do livreto educacional desenvolvido nesta pesquisa.

Figura 2 – QR Code para acesso à versão digital do livreto educacional



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

4.2 MEDIAÇÃO DIDÁTICA, ATUALIZAÇÃO CURRICULAR E ORGANIZAÇÃO CONCEITUAL

A Física de Partículas constitui um domínio marcado por elevado grau de abstração e formalização matemática. A formulação completa do Modelo Padrão envolve campos quânticos, simetrias de gauge, representações de grupos, processos de interação e técnicas de cálculo que ultrapassam os conhecimentos matemáticos normalmente desenvolvidos no Ensino Médio. A introdução desse tema na Educação Básica exige, por conseguinte, um processo cuidadoso de seleção, reorganização e recontextualização dos conteúdos.

Nesse contexto, o livreto pode atuar como instrumento de mediação entre o conhecimento científico de referência e o conhecimento escolar. Essa mediação não significa simplificar indiscriminadamente a teoria, mas identificar seus conceitos estruturantes e apresentá-los em nível compatível com o público-alvo. A transposição

didática deve preservar a coerência do conhecimento científico ao mesmo tempo que redefine sua linguagem, seus exemplos, seu encadeamento e suas formas de representação para atender às finalidades educativas¹.

O material procura realizar essa mediação ao distinguir partículas elementares e compostas, apresentar a organização dos férmions e dos bósons, relacionar os bósons mediadores às interações fundamentais e situar o bóson de Higgs no contexto do mecanismo associado à massa das partículas elementares. Essas distinções podem contribuir para evitar concepções equivocadas, como a ideia de que prótons e nêutrons são partículas elementares, de que todas as partículas desempenham a mesma função no Modelo Padrão ou de que toda a massa da matéria é produzida diretamente pelo campo de Higgs.

A função mediadora do livreto também se manifesta na articulação entre diferentes níveis de descrição da matéria. O estudante pode partir de conceitos já estudados, como átomo, núcleo, próton, nêutron e elétron, e avançar para a compreensão de quarks, léptons, hádrons e bósons mediadores. Essa progressão permite relacionar conteúdos escolares tradicionais à descrição contemporânea da estrutura da matéria, evitando que a Física de Partículas apareça como conhecimento inteiramente desconectado do percurso formativo anterior.

Uma das principais potencialidades do produto consiste, portanto, em contribuir para a atualização curricular. Embora a Física Clássica seja indispensável à formação científica dos estudantes, sua predominância quase exclusiva pode produzir a impressão de que a Física se encerrou no século XIX. A inclusão de temas relacionados à Mecânica Quântica, à Relatividade, à Física Nuclear e à Física de Partículas permite apresentar uma ciência vinculada às pesquisas, tecnologias e questões que marcaram os séculos XX e XXI.

O livreto oferece uma possibilidade de aproximação com a Física contemporânea sem exigir a reprodução do formalismo matemático. Sua abordagem qualitativa permite discutir a constituição da matéria, as interações fundamentais, a antimatéria e o bóson de Higgs em linguagem compatível com o Ensino Médio. Esses temas podem ampliar a compreensão dos estudantes sobre o alcance explicativo da Física e sobre sua presença em debates científicos atuais.

A atualização curricular não deve ser entendida como simples substituição de conteúdos clássicos por conteúdos modernos. Seu potencial formativo encontra-se na construção de relações entre diferentes domínios. O estudo da carga elétrica pode ser retomado na análise das cargas fracionárias dos quarks; a conservação da energia pode ser discutida em processos de criação e aniquilação de partículas; a equivalência entre massa e energia pode ser relacionada às colisões de altas energias; e a noção de campo pode ser ampliada por meio da discussão das interações mediadas por bósons. Desse modo, os conteúdos não aparecem como blocos isolados, mas como

elementos de uma construção teórica historicamente desenvolvida e ainda aberta a transformações.

A grande quantidade de partículas, propriedades e classificações envolvidas no Modelo Padrão pode dificultar a compreensão inicial do estudante. Sem uma organização adequada, o tema corre o risco de ser reduzido a uma lista de nomes pouco significativos. O formato de livreto foi escolhido justamente para enfrentar esse problema por meio de uma estrutura que favorece comparação, classificação e síntese.

O livreto também pode auxiliar na compreensão da hierarquia estrutural da matéria. Uma sequência de ensino pode partir de objetos macroscópicos, avançar para moléculas, átomos e núcleos, alcançar prótons e nêutrons e, finalmente, apresentar quarks e léptons. Essa progressão ajuda a construir o significado de partícula elementar e permite discutir por que determinados constituintes são considerados fundamentais no estado atual do conhecimento.

A organização conceitual pode ser explorada por meio de atividades de classificação. Os estudantes podem ser convidados a distinguir partículas elementares e compostas, identificar quais partículas constituem a matéria ordinária, relacionar cada bóson à interação correspondente e explicar por que a gravidade não integra o Modelo Padrão. Atividades dessa natureza favorecem a articulação entre conceitos e reduzem a tendência à memorização isolada de nomes e propriedades.

4.3 RECURSOS VISUAIS, APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E NATUREZA DA CIÊNCIA

Os fenômenos investigados pela Física de Partículas não são diretamente acessíveis à percepção cotidiana. Quarks, léptons e bósons não podem ser observados como objetos macroscópicos, e os registros experimentais resultam de processos complexos de detecção, reconstrução e interpretação. Por essa razão, imagens, diagramas, esquemas e representações gráficas desempenham função importante na introdução do tema.

No livreto, os recursos visuais organizam informações, destacam relações e podem reduzir a sobrecarga cognitiva produzida por longas descrições textuais. Quadros comparativos facilitam a análise das propriedades das partículas; linhas do tempo evidenciam a construção histórica do conhecimento; esquemas de composição representam prótons e nêutrons em termos de quarks; e diagramas conceituais ajudam a relacionar partículas, campos e interações.

A utilização dessas imagens, entretanto, exige mediação crítica. Representações de partículas como pequenas esferas coloridas possuem função didática, mas não correspondem literalmente à natureza dos objetos quânticos. Quando empregadas sem discussão, podem reforçar interpretações clássicas inadequadas. Cabe ao professor explicitar que as figuras funcionam como modelos de representação e que toda imagem

científica seleciona determinados aspectos do fenômeno enquanto omite outros.

A análise crítica das representações também possui valor formativo. Os estudantes podem comparar diferentes imagens do átomo, do núcleo ou das partículas, discutir quais elementos cada modelo destaca e identificar os limites das analogias utilizadas. Esse exercício ajuda a compreender que modelos científicos não são cópias da realidade, mas construções intelectuais elaboradas para representar, explicar e prever fenômenos.

A organização do livreto também pode favorecer processos de aprendizagem significativa. Essa perspectiva sustenta que novos conhecimentos são incorporados de maneira mais consistente quando podem relacionar-se a conceitos já presentes na estrutura cognitiva do estudante^{2,4}. O material estabelece vínculos entre conteúdos conhecidos e conceitos da Física de Partículas, evitando que o Modelo Padrão seja apresentado como uma coleção inteiramente nova e sem conexões com a formação anterior.

O estudo dos modelos atômicos, por exemplo, pode servir como ponto de partida para discutir a evolução das concepções sobre a matéria. O elétron, normalmente apresentado no estudo do átomo, pode ser retomado como partícula elementar pertencente à família dos léptons. Prótons e nêutrons, conhecidos no contexto da estrutura nuclear, podem ser reinterpretados como partículas compostas por quarks. A noção de interação pode ser relacionada às forças estudadas anteriormente; o princípio de conservação pode ser retomado na análise de decaimentos; e o conceito de energia pode ser associado à produção de partículas em colisores.

O livreto pode ainda funcionar como organizador prévio. Antes do estudo detalhado, o professor pode utilizá-lo para oferecer uma visão geral do tema, destacando suas principais categorias, relações e questões orientadoras. Essa visão inicial pode auxiliar o estudante a integrar as informações apresentadas posteriormente e a localizar cada conceito em uma estrutura mais ampla.

A aprendizagem significativa, contudo, não resulta automaticamente da presença de imagens ou de linguagem acessível. É necessário que o professor investigue os conhecimentos prévios, formule problemas, promova comparações entre ideias e estimule os estudantes a explicar os conceitos com suas próprias palavras. O livreto oferece suporte para essas ações, mas não substitui a atividade intelectual do estudante nem a mediação docente.

A contextualização histórica amplia essa dimensão formativa. Ao acompanhar a passagem dos modelos atômicos às partículas subatômicas e ao Modelo Padrão, o estudante pode perceber que o conhecimento científico não surgiu de forma pronta, linear ou inevitável. Descobertas como as do elétron, do núcleo atômico, do nêutron, do pósitron, dos quarks e do bóson de Higgs envolveram problemas teóricos, resultados experimentais, controvérsias, revisões e mudanças conceituais.

Essa perspectiva pode contribuir para superar uma visão dogmática da ciência. Em lugar de apresentar o Modelo Padrão como verdade absoluta e definitiva, o livroto pode situá-lo como uma teoria extremamente bem-sucedida no domínio em que foi testada, mas ainda limitada. Questões como matéria escura, energia escura, assimetria entre matéria e antimatéria e ausência de uma descrição quântica da gravidade mostram que a Física permanece aberta a novos desenvolvimentos.

A discussão dessas limitações pode estimular a curiosidade e favorecer uma compreensão mais rigorosa da natureza da ciência. Reconhecer os limites de uma teoria não significa negar sua validade, mas compreender o alcance de suas explicações, as evidências que a sustentam e os problemas que permanecem em aberto. O livroto pode, assim, aproximar o estudante não apenas dos resultados da ciência, mas também de seus métodos, incertezas e processos de construção.

4.4 POSSIBILIDADES DE UTILIZAÇÃO PEDAGÓGICA E INTEGRAÇÃO CURRICULAR

As potencialidades do livroto tornam-se mais evidentes quando o material é integrado a estratégias que promovam participação intelectual dos estudantes. Sua organização permite utilizá-lo como apoio a atividades de leitura, comparação, classificação, resolução de problemas, argumentação, produção textual e divulgação científica.

Em atividades de leitura orientada, o professor pode selecionar uma seção do livroto e formular questões que conduzam à identificação dos conceitos centrais. Os estudantes podem registrar dúvidas, elaborar sínteses e explicar as relações entre partículas, propriedades e interações. Após a leitura, a construção de mapas conceituais pode ser utilizada para relacionar matéria, átomo, núcleo, hádrons, quarks, léptons, bósons e interações fundamentais, tornando visíveis as relações hierárquicas e funcionais do Modelo Padrão.

Outra possibilidade consiste na classificação de partículas. Cartões contendo nomes, símbolos e propriedades podem ser distribuídos entre grupos, que deverão organizar as partículas e justificar os critérios utilizados. Em seguida, a classificação produzida pode ser comparada à estrutura apresentada no livroto. Essa dinâmica desloca a ênfase da reprodução de definições para a construção de critérios e para a argumentação.

A composição dos hádrons oferece uma oportunidade de articular conceitos físicos e operações matemáticas. A carga elétrica do próton pode ser obtida a partir de dois quarks *up* e um quark *down*,

$$Q_p = 2 \left(+\frac{2}{3}e \right) + \left(-\frac{1}{3}e \right) = +e, \quad (4.1)$$

enquanto a carga elétrica do nêutron resulta da combinação de um quark *up* e dois

quarks *down*,

$$Q_n = \left(+\frac{2}{3}e\right) + 2\left(-\frac{1}{3}e\right) = 0. \quad (4.2)$$

Essa atividade permite relacionar as propriedades dos constituintes às propriedades das partículas compostas e atribuir significado físico às cargas fracionárias dos quarks. Também favorece a discussão de que os quarks não são observados isoladamente em condições ordinárias, mas aparecem confinados em hádrons.

O livreto pode apoiar ainda debates sobre questões em aberto. Perguntas como por que a gravidade não integra o Modelo Padrão, o que pode constituir a matéria escura e por que o Universo observável contém mais matéria do que antimatéria ajudam a apresentar a ciência como campo de investigação em desenvolvimento. Questões sobre o campo de Higgs podem ser utilizadas para discutir a diferença entre a massa de partículas elementares e a massa de sistemas compostos.

O desenvolvimento da argumentação pode ser favorecido pela formulação de questões que exijam explicação e justificativa. Em vez de solicitar apenas os nomes dos quarks, o professor pode pedir que o estudante explique por que prótons e nêutrons não são elementares. Em lugar de perguntar somente qual bóson está associado à interação eletromagnética, pode propor que o estudante relacione o fóton a fenômenos conhecidos e diferencie sua função daquela desempenhada pelos bósons $W^\pm$ e Z^0 .

O material também pode apoiar discussões sobre investimentos em grandes experimentos, aplicações tecnológicas da pesquisa básica, colaboração científica internacional, circulação de informações e relações entre ciência e sociedade. Tais discussões ampliam a formação para além da aquisição de conceitos, incluindo análise crítica da produção científica, das condições históricas de sua realização e de seus impactos sociais.

Outra possibilidade consiste na produção de materiais de divulgação científica. Os estudantes podem utilizar o livreto como fonte inicial para elaborar textos, painéis, infográficos, podcasts, vídeos ou apresentações sobre uma partícula, uma descoberta ou uma instalação experimental. Essa atividade favorece a apropriação conceitual, a comunicação científica e o uso crítico de fontes, desde que o professor oriente a consulta a materiais confiáveis e a verificação das informações.

O livreto foi concebido prioritariamente como recurso de apoio ao professor. Sua organização pode facilitar o planejamento de aulas, a seleção dos conceitos e a construção de sequências didáticas sobre Física de Partículas. O docente pode utilizar o material integralmente ou selecionar partes específicas. Uma aula sobre estrutura da matéria pode empregar as seções relativas a partículas elementares e compostas; uma sequência sobre interações fundamentais pode recorrer aos quadros que relacionam bósons mediadores e partículas participantes; e uma abordagem histórica pode mobilizar as páginas dedicadas aos modelos atômicos, à antimatéria e à

descoberta do bóson de Higgs.

O material também pode apoiar professores que não tiveram formação aprofundada em Física de Partículas durante a graduação. Ao reunir informações centrais em linguagem organizada, o livreto funciona como ponto de partida para o planejamento. Seu uso, contudo, deve ser acompanhado pela preparação prévia da mediação e, sempre que necessário, pela consulta a referências científicas especializadas. Essa precaução é especialmente importante em temas sujeitos a simplificações recorrentes ou a interpretações equivocadas.

Sua flexibilidade permite utilizá-lo em aulas expositivas dialogadas, atividades em grupo, projetos interdisciplinares, feiras de ciências, clubes de Física e ações de divulgação científica. O material pode igualmente apoiar a produção de slides, mapas conceituais, cartazes e conteúdos digitais, adaptando-se a diferentes cargas horárias, objetivos e condições escolares.

A abordagem do Modelo Padrão também pode contribuir para competências relacionadas à área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias. A Base Nacional Comum Curricular valoriza a compreensão de modelos científicos, a análise de fenômenos, a investigação, a argumentação baseada em evidências e a utilização de diferentes linguagens³. O livreto pode apoiar essas finalidades ao apresentar modelos históricos e contemporâneos da matéria, promover a leitura de tabelas e diagramas, estimular a interpretação de evidências experimentais e favorecer discussões sobre ciência e tecnologia.

A análise das partículas elementares permite articular escalas de organização da matéria e discutir transformações de energia. O estudo de aceleradores e detectores pode aproximar conceitos físicos de tecnologias desenvolvidas em contextos de pesquisa. A articulação com a BNCC, entretanto, não deve ser interpretada como correspondência automática entre uma página do livreto e uma habilidade específica. O potencial curricular depende da sequência de ensino construída pelo professor, das questões propostas e das atividades em que o material é inserido.

A Física de Partículas também permite estabelecer relações com diferentes áreas do conhecimento. Na Química, o livreto pode ampliar a discussão sobre estrutura atômica, radioatividade e relações entre propriedades microscópicas e comportamento da matéria. Na Matemática, podem ser exploradas ordens de grandeza, notação científica, escalas, proporcionalidade, frações e interpretação de gráficos. As cargas dos quarks constituem um exemplo de utilização de operações com frações em um problema físico.

Na História e na Filosofia da Ciência, podem ser discutidos os contextos de produção das teorias, a relação entre experimentos e modelos, as controvérsias, a colaboração internacional e os critérios de validação do conhecimento científico. Na área de Linguagens, a elaboração de textos de divulgação, infográficos, podcasts e

apresentações permite trabalhar comunicação científica e adequação da linguagem a diferentes públicos. Essas relações ampliam o significado dos conteúdos e mostram que a ciência contemporânea não se organiza em compartimentos isolados.

A linguagem sintética e a organização visual do livreto podem facilitar o primeiro contato com um tema frequentemente considerado difícil. A acessibilidade pedagógica, entretanto, não se reduz à simplificação vocabular. Os conceitos precisam ser apresentados com encadeamento lógico, exemplos pertinentes e explicitação dos termos técnicos. O professor pode adaptar o material às necessidades da turma, ampliar o tamanho das fontes, descrever oralmente as imagens e disponibilizar versões digitais compatíveis com recursos de acessibilidade.

Atividades colaborativas também podem favorecer a participação de estudantes com diferentes ritmos e formas de aprendizagem. Ao mesmo tempo, deve-se evitar que a aparência lúdica das ilustrações produza infantilização do conteúdo. O recurso visual precisa aproximar o estudante sem comprometer a seriedade científica. O equilíbrio entre atratividade, acessibilidade e rigor constitui um dos desafios centrais da utilização pedagógica do produto.

Embora o livreto apresente possibilidades relevantes, é necessário reconhecer seus limites. O material não substitui a formação do professor, a consulta a referências científicas ou a construção de uma sequência didática coerente. Também não contempla o formalismo completo da Física de Partículas, uma vez que foi elaborado para uma abordagem introdutória compatível com o Ensino Médio.

A ausência de aplicação empírica impede afirmar que o produto aumenta a aprendizagem, o interesse, a motivação ou o desempenho dos estudantes. Afirmações dessa natureza somente poderiam ser sustentadas por pesquisas posteriores, desenvolvidas com instrumentos adequados de coleta e análise de dados. Neste trabalho, as conclusões restringem-se à coerência teórico-pedagógica do material e às possibilidades de uso identificadas a partir de sua estrutura e de seus fundamentos.

Outro limite decorre da própria natureza das representações. Imagens e analogias facilitam o acesso inicial, mas podem produzir interpretações inadequadas quando tomadas literalmente. A mediação docente é indispensável para explicitar o caráter representacional das figuras e discutir os limites de cada modelo. Da mesma forma, a constante atualização da Física de Partículas pode exigir futuras revisões de dados, valores, exemplos e interpretações. O livreto deve ser compreendido, portanto, como material passível de revisão e aperfeiçoamento.

Uma etapa futura poderá consistir na aplicação do produto em turmas do Ensino Médio, permitindo investigar a compreensão conceitual dos estudantes, suas dificuldades, a clareza das imagens e a adequação das atividades. O material poderá igualmente ser avaliado por professores de Física e especialistas em Ensino de Ciências, considerando critérios como correção científica, organização, linguagem,

legibilidade, pertinência curricular e viabilidade de uso.

Questionários, entrevistas, registros de aula, produções dos estudantes e mapas conceituais poderão fornecer dados sobre a recepção do produto. A combinação dessas fontes poderá favorecer uma análise mais consistente dos processos de utilização e aprendizagem. Versões futuras também poderão incorporar atividades adicionais, orientações específicas ao professor, recursos digitais, links para simulações e materiais complementares, além de uma versão interativa do livreto.

A análise teórico-pedagógica realizada permite reconhecer que o produto apresenta potencial para mediar a relação entre conhecimento científico especializado e conhecimento escolar, contribuir para a inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, organizar visualmente conceitos e interações, relacionar conteúdos novos aos conhecimentos prévios, favorecer a compreensão histórica da ciência e apoiar atividades de comparação, classificação e argumentação.

Conclui-se que o livreto pode constituir um recurso relevante para aproximar o Ensino Médio da Física contemporânea. Ao reunir rigor conceitual, organização visual, contextualização histórica e linguagem acessível, o produto oferece suporte para que professores abordem o Modelo Padrão sem reduzir o tema a uma enumeração de partículas. Seu principal valor pedagógico está na possibilidade de transformar um conteúdo frequentemente percebido como distante em objeto de estudo escolar, funcionando não como encerramento do processo de ensino, mas como ponto de partida para investigações, debates e novas aprendizagens.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como propósito investigar de que maneira os fundamentos científicos do Modelo Padrão das Partículas Elementares podem ser reorganizados pedagogicamente para subsidiar sua inserção no Ensino Médio por meio da elaboração de um produto educacional. A motivação central decorreu da constatação de que, embora a Física Moderna e Contemporânea ocupe posição de destaque no desenvolvimento científico atual e esteja contemplada em documentos curriculares nacionais, sua presença na Educação Básica ainda ocorre de forma limitada, muitas vezes restrita a breves referências nos livros didáticos ou aos últimos encontros do calendário letivo.

Partindo desse problema, a dissertação buscou construir uma proposta que articulasse rigor científico, fundamentação pedagógica e viabilidade educacional. Para isso, realizou-se uma investigação qualitativa, de natureza bibliográfica, documental, exploratória e aplicada, orientada pela produção de um livreto didático destinado a apoiar professores na abordagem introdutória do Modelo Padrão das Partículas Elementares. Ao longo do trabalho, procurou-se demonstrar que a aproximação entre conhecimento científico especializado e conhecimento escolar não depende da simples redução da complexidade dos conteúdos, mas de um processo cuidadoso de seleção, reorganização e transposição didática.

Os objetivos propostos foram alcançados por meio da construção de um percurso integrado. Inicialmente, discutiu-se a evolução histórica das concepções sobre a estrutura da matéria, evidenciando a passagem dos modelos atômicos clássicos à formulação contemporânea do Modelo Padrão. Em seguida, foram apresentados seus fundamentos físicos, suas evidências experimentais, suas limitações e suas implicações para o ensino. Posteriormente, analisaram-se referenciais da Educação em Ciências, especialmente aqueles relacionados à aprendizagem significativa, à transposição didática e ao papel mediador do professor, os quais sustentaram a elaboração do produto educacional.

O livreto desenvolvido constitui a principal contribuição desta pesquisa. Sua organização privilegia a construção progressiva dos conceitos, a utilização de recursos visuais, a contextualização histórica e a integração entre diferentes conteúdos da Física, permitindo que temas tradicionalmente considerados complexos sejam apresentados em linguagem compatível com o Ensino Médio sem perder consistência conceitual. O produto foi concebido como instrumento de apoio ao trabalho docente, capaz de favorecer atividades de leitura, classificação, argumentação, investigação e divulgação científica, preservando o protagonismo do professor na condução do processo de ensino e aprendizagem.

É importante destacar que esta investigação não teve como objetivo validar

empiricamente o produto educacional. Não foram realizadas aplicações em sala de aula nem procedimentos sistemáticos de avaliação com estudantes ou professores. Consequentemente, as conclusões apresentadas referem-se à coerência científica, pedagógica e metodológica do livreto e às suas potencialidades de utilização, não constituindo evidências sobre sua efetividade em contextos reais de ensino. Essa delimitação fortalece o rigor metodológico da pesquisa e estabelece claramente o alcance de seus resultados.

As limitações identificadas também indicam caminhos promissores para pesquisas futuras. A aplicação do livreto em diferentes contextos escolares poderá fornecer evidências acerca de sua recepção, de sua contribuição para a aprendizagem conceitual e de sua adequação às diferentes realidades educacionais. Estudos posteriores poderão incorporar avaliações por especialistas, versões digitais interativas, recursos multimídia, sequências didáticas estruturadas e instrumentos de acompanhamento da aprendizagem, ampliando tanto o alcance quanto a robustez do produto educacional.

Do ponto de vista da formação científica, espera-se que este trabalho contribua para ampliar o espaço da Física Moderna e Contemporânea na Educação Básica e incentive abordagens que apresentem a ciência como empreendimento histórico, coletivo e permanentemente em construção. A compreensão de conceitos relacionados às partículas elementares, às interações fundamentais e aos limites do Modelo Padrão pode favorecer uma visão mais ampla da ciência contemporânea e aproximar os estudantes de temas presentes na pesquisa atual.

Conclui-se, portanto, que a elaboração de materiais didáticos fundamentados cientificamente e orientados por referenciais consolidados da Educação em Ciências constitui uma estratégia relevante para aproximar o conhecimento produzido na universidade das práticas desenvolvidas na escola. Nesse contexto, o livreto proposto representa uma contribuição para a difusão da Física de Partículas no Ensino Médio e um ponto de partida para novas investigações, adaptações e aperfeiçoamentos. Mais do que apresentar um conjunto organizado de informações sobre o Modelo Padrão, este trabalho procura demonstrar que é possível construir recursos educacionais capazes de conciliar rigor científico, clareza didática e compromisso com uma formação crítica, atualizada e significativa para os estudantes.

REFERÊNCIAS

- 1 Chevallard, Yves. **La Transposition Didactique**: Du Savoir Savant au Savoir Enseigné. La Pensée Sauvage. 1991. 14, 15, 27, 32, 41
- 2 AUSUBEL, David P. **Aquisição e Retenção de Conhecimentos**: Uma Perspectiva Cognitiva. 1. ed. Lisboa: Plátano, 2003. 14, 15, 27, 32, 43
- 3 BRASIL. *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília: Ministério da Educação, 2018. 15, 26, 31, 32, 46
- 4 MOREIRA, Marco Antonio. **Aprendizagem Significativa**: a teoria e textos complementares. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011. 15, 27, 32, 43
- 5 BECKER, Matheus Henrique Thomas; HEIDEMANN, Leonardo Albuquerque; LIMA, Nathan Willig. History of Science in Physics Education in the Last Decade: Which Direction We Are Heading? *Science & Education*, v. 34, n. 5, p. 3041–3078, 2025. 18
- 6 SANTOS, Micael Campos; OLIVEIRA, Daniel Souza de; SIQUEIRA, Maxwell Roger da Purificação. Revisão Sistemática das produções sobre Natureza da Ciência e Física Moderna e Contemporânea no ENPEC. *Revista Internacional de Pesquisa em Didática das Ciências e Matemática*, v. 6, e025005, 2025. 18
- 7 Gil Pérez, Daniel and Carrascosa, Jaime. **A Natureza da Ciência**: Implicações para o Ensino. Enseñanza de las Ciencias. 1999. 18
- 8 ROCHA, José Fernando Moura (org.). *Origens e evolução das ideias da Física*. 1. ed. Salvador: EDUFBA, 2002. 18
- 9 DALTON, John. *A New System of Chemical Philosophy*. v. 1. Manchester: Printed by S. Russell for R. Bickerstaff, 1808. 18
- 10 KRAGH, Helge. **Quantum Generations**: A History of Physics in the Twentieth Century. 1. ed. Princeton: Princeton University Press, 1999. ISBN 978-0-691-01206-3. 18
- 11 RUTHERFORD, Ernest. The scattering of alpha and beta particles by matter and the structure of the atom. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Series 6, v. 21, n. 125, p. 669–688, maio 1911. 18
- 12 BOHR, Niels. On the constitution of atoms and molecules. Part I. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Series 6, v. 26, n. 151, p. 1–25, jul. 1913. 19

- 13 GELL-MANN, Murray. *The Eightfold Way*. Pasadena: California Institute of Technology, 1961. 19
- 14 GELL-MANN, Murray. A schematic model of baryons and mesons. *Physics Letters*, v. 8, n. 3, p. 214–215, fev. 1964. 19
- 15 ZWEIG, George. *An $SU(3)$ Model for Strong Interaction Symmetry and Its Breaking*. Geneva: European Organization for Nuclear Research (CERN), 1964. (CERN Report, 8182/TH.401). 19
- 16 DIRAC, Paul Adrien Maurice. The quantum theory of the electron. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A**: Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, v. 117, n. 778, p. 610–624, fev. 1928. 21
- 17 PESKIN, Michael E.; SCHROEDER, Daniel V. *An Introduction to Quantum Field Theory*. Reading: Addison-Wesley, 1995. ISBN 978-0-201-50397-5. 22
- 18 WEINBERG, Steven. *The Quantum Theory of Fields*. v. 1: Foundations. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. ISBN 978-0-521-55001-7. 22
- 19 RYDER, Lewis H. *Quantum Field Theory*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. ISBN 978-0-521-47814-4. 22
- 20 DAS, Ashok. *Lectures on Quantum Field Theory*. Hackensack: World Scientific Publishing, 2008. ISBN 978-981-279-170-2. 22
- 21 GLASHOW, Sheldon L. Partial symmetries of weak interactions. *Nuclear Physics*, v. 22, n. 4, p. 579–588, fev. 1961. 23
- 22 WEINBERG, Steven. A model of leptons. *Physical Review Letters*, v. 19, n. 21, p. 1264–1266, nov. 1967. 23
- 23 SALAM, Abdus. Weak and electromagnetic interactions. In: SVARTHOLM, Nils (ed.). **Elementary Particle Theory**: Proceedings of the Nobel Symposium Held 1968 at Lerum, Sweden. Stockholm: Almqvist & Wiksell, 1968. p. 367–377. 23
- 24 HIGGS, Peter W. Broken symmetries and the masses of gauge bosons. *Physical Review Letters*, v. 13, n. 16, p. 508–509, out. 1964.
- 25 ATLAS COLLABORATION. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B*, v. 716, n. 1, p. 1–29, set. 2012. 24
- 26 CMS COLLABORATION. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Physics Letters B*, v. 716, n. 1, p. 30–61, set. 2012. 24

- 27 SAKURAI, J. J.; NAPOLITANO, Jim. *Modern Quantum Mechanics*. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2020. ISBN 978-1-108-47322-4.
- 28 GRIFFITHS, David J. *Introduction to Elementary Particles*. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- 29 HALZEN, Francis; MARTIN, Alan D. **Quarks and Leptons**: An Introductory Course in Modern Particle Physics. New York: John Wiley & Sons, 1984. ISBN 978-0-471-88741-6.
- 30 PERKINS, Donald H. *Introduction to High Energy Physics*. 4. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 978-0-521-62196-0.
- 31 MARTIN, Brian R. *Particle Physics*. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 978-0-470-03294-7.
- 32 UA1 COLLABORATION. Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at $\sqrt{s} = 540$ GeV. *Physics Letters B*, v. 122, n. 1, p. 103–116, fev. 1983.
- 33 PARTICLE DATA GROUP. Review of Particle Physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, v. 2024, n. 8, 083C01, 2024.
- 34 Siqueira, Maxwell Roger da Purificação. **Do visível ao indivisível**: uma proposta de Física de Partículas Elementares para o Ensino Médio. Universidade de São Paulo. 2006. 25
- 35 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, p. 209–214, dez. 1992. 25, 26, 27
- 36 BYBEE, Rodger W. **Achieving Scientific Literacy**: From Purposes to Practices. Portsmouth: Heinemann, 1997. ISBN 978-0-325-00090-8. 26
- 37 SASSERON, Lúcia Helena; CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. Alfabetização científica: uma revisão bibliográfica. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 59–77, 2011. 26
- 38 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, p. 23–48, 2000. 26, 27
- 39 LOZADA, Cláudia de Oliveira; ARAÚJO, Mauro Sérgio Teixeira de. Física de Partículas Elementares no Ensino Médio: as perspectivas dos professores em relação ao ensino do Modelo Padrão. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 17.,

2007, São Luís. *Anais do XVII Simpósio Nacional de Ensino de Física*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2007.

40 Lozada, A. and Araújo, I. S.. *Física de Partículas Elementares no Ensino Médio*. Revista Brasileira de Ensino de Física. 2006.

41 BROCKINGTON, Guilherme; PIETROCOLA, Maurício. Serão as regras da transposição didática aplicáveis aos conceitos de Física Moderna? *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 10, n. 3, p. 387–404, dez. 2005. 27

42 SILVA JÚNIOR, José Francisco da. Interação do docente de Física com seus alunos na utilização das TICs no ensino de Física de Partículas Elementares através de jogos digitais. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 11, e180111127085, 2022.

43 GOMES DA SILVA, Ana Suellen; CARVALHO, Hercília Alves Pereira de; PHILIPPSEN, Gisele Strieder. Ensino de Física Moderna no Ensino Médio: uma proposta didática para o estudo da evolução do modelo atômico. *Revista Insignare Scientia*, v. 5, n. 3, p. 392–408, 2022.

44 BARRACCO, Angelica Cassoni. *Ensino de Física de Partículas na Educação Básica*. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado e Licenciatura em Física) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2019.

45 MORA CASTIBLANCO, Jhon Edward. La transposición didáctica del saber sabio al saber enseñado. Autor: Yves Chevallard. *Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias*, v. 9, n. 2, p. 97–100, 2014. DOI: 10.14483/jour.gdla.2014.2.a07.

46 DELIZOICOV, Demétrio; ANGOTTI, José André; PERNAMBUCO, Marta Maria. **Ensino de Ciências: fundamentos e métodos**. 5. ed. São Paulo: Cortez, 2018.

47 MINAYO, Maria Cecília de Souza. **O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde**. 14. ed. São Paulo: Hucitec, 2014. 30

48 GIL, Antonio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 30, 31

49 SEVERINO, Antônio Joaquim. *Metodologia do trabalho científico*. 24. ed. rev. e atual. São Paulo: Cortez, 2017. 30

50 CARVALHO, Anna Maria Pessoa de (org.). **Ensino de Ciências por Investigação: condições para implementação em sala de aula**. São Paulo: Cengage Learning, 2013. 27