UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA

DANIEL TRUGILLO MARTINS FONTES

**Uma análise do ensino de eletromagnetismo a partir da teoria do ensino
desenvolvimental de Davydov**

SÃO PAULO

2020

DANIEL TRUGILLO MARTINS FONTES

**Uma análise do ensino de eletromagnetismo a partir da teoria do ensino
desenvolvimental de Davydov**

Versão Original

Dissertação apresentada ao Programa Interunidades em
Ensino de Ciências da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em Educação em Ciências.

Área de Concentração: Ensino de Física

Orientador: Prof. Dr. André Machado Rodrigues

SÃO PAULO

2020

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

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

Fontes, Daniel Trugillo Martins

Uma análise do ensino de eletromagnetismo a partir da teoria do ensino desenvolvimental de Davydov. São Paulo, 2020.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Instituto de Biociências.
Orientador: Prof. Dr. André Machado Rodrigues

Área de Concentração: Ensino de Física.

Unitermos: 1. Física – Estudo e ensino; 2. Ensino e aprendizagem; 3. Psicologia do desenvolvimento; 4. Formação de conceito; 5. Eletromagnetismo – Estudo e ensino.

USP/IF/SBI-051/2020

The paradox of education is precisely this - that as one begins to become conscious one begins to examine the society in which he is being educated.

James Baldwin

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Carlos e Doneisa, que sempre me incentivaram na escolha da carreira e se preocuparam em me passar valores ético-morais que me moldaram e que seu reflexo se faz presente ao longo deste trabalho.

Ao meu irmão Pedro, que esteve comigo em inesquecíveis momentos, dos mais variados, sendo minha pessoa favorita para debater ou sentar-se em absoluto silêncio.

Ao professor Dr. André Machado Rodrigues, orientador e amigo, por ter me recebido incontáveis vezes em sua sala, por sua compreensão e apoio, que soube respeitar minhas limitações, e por ter compartilhado comigo sua dedicação e opinião, competente e honesta, que foram de grande valia para elaboração desta dissertação.

Ao professor Dr. Seth Chaiklin, que durante o período de estágio, me recebeu na University College Copenhagen com extrema simpatia, atenção e compromisso para com os debates acerca da literatura davydoviana, e que até hoje mantém contato virtual, o que é de valia inestimável e que ilumina o corpo e o sentido dessa pesquisa.

À professora Dra. Valéria Silva Dias, por seus pertinentes apontamentos durante o exame de qualificação; apontamentos sem os quais essa dissertação teria ficado à deriva.

Aos membros da banca de defesa, por suas leituras críticas e valiosas contribuições que muito contribuíram para a elucidação, competência e justificação da discussão aqui apresentada.

Aos meus amigos mais próximos, Aline, Gabriela, Juliângelo, Laís, Carolina, Felipe, Guilherme, Letícia, Taynara e Yasmin que em diversos momentos, com suas características únicas, e particulares níveis de paciência e compreensão, compartilharam risadas, suportaram minhas dores, alegrias e tristezas, me aconselharam durante as crises existenciais, educacionais ou científicas, e que simplesmente estavam presentes para conversas despretensiosas, favores e lazeres que incontestavelmente me deram confiança e ânimo para trilhar mais essa etapa da minha formação.

Aos meus amigos distanciados por fatores da vida, que não vejo há anos, mas que são virtualmente próximos, mantendo contato através das redes sociais, e que sempre me permitem uma boa troca de memes, ajudando

espairecer um pouco a cabeça da situação política e educacional brasileira e restaurando fé na humanidade.

Aos amigos que compõem e permitem que construamos todos os dias um pouquinho o grupo de divulgação científica Via Saber, que em maior ou menor grau, enxerga na promoção de eventos de divulgação científica um importante passo embrionário para aproximar a sociedade da ciência, seus métodos, necessidades e importâncias.

À sociedade brasileira, por meio da CAPES, que financiou parte dessa pesquisa através da concessão de bolsa.

RESUMO

FONTES, Daniel Trugillo Martins. **Uma análise do ensino de eletromagnetismo a partir da teoria do ensino desenvolvimental de Davydov**. 2020. 122f. Dissertação (Mestrado Educação em Ciências) – Interunidades em Ensino de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Nesta dissertação apresentamos um estudo que visa, a partir de uma perspectiva histórico-cultural, delinear um modelo teórico sobre o conteúdo do ensino de eletromagnetismo. Para essa realização, entre a perspectiva histórico-cultural, o ensino de física e o eletromagnetismo, utilizamos da teoria do ensino desenvolvimental e dos instrumentos que ela dispõe para entender a formação de pensamento e conceitos teóricos. A teoria criada por Vigotski e ampliada com contribuições importantes de colaboradores até culminar num novo objeto de análise proposto por Davydov ajudou na busca por uma compreensão mais ampla do processo de ensino. Como indício motivador desta abordagem, realizamos uma revisão da literatura a respeito do ensino de eletromagnetismo através de trabalhos publicados nos principais periódicos nacionais. Nessa revisão, notamos que tentativas de diálogo entre a teoria de Davydov e o ensino de Física são raras, e com o ensino de eletromagnetismo são inexistentes. Ademais, percebemos que os conceitos da teoria histórico-cultural que fundamentam práticas de ensino de eletromagnetismo estão principalmente relacionados ao papel mediador do professor. Posteriormente nos aprofundamos nos aspectos lógicos e históricos da gênese e do desenvolvimento de conceitos importantes para o entendimento atual do eletromagnetismo. A partir disso, fomos capazes de elaborar uma síntese dos conceitos essenciais que estruturam os fenômenos eletromagnéticos clássicos, a saber: movimento, variação e interação. Por fim investigamos uma situação de análise desses conceitos concretizando-os na geração, transmissão e utilização da energia elétrica. A principal conclusão desse trabalho é a elaboração de um primeiro modelo teórico. Por fim, vemos a possibilidade de diálogo entre a teoria de Davydov e o ensino de Física no geral, e do eletromagnetismo em particular, a fim de promover o pensamento teórico nos escolares.

Palavras-chave: Ensino de Física, Eletromagnetismo, Teoria do Ensino Desenvolvimental, Davydov, Conceitos Teóricos.

ABSTRACT

FONTES, Daniel Trugillo Martins. **Analysis between the teaching of electromagnetism and Davydov's theory of developmental teaching**. 2020. 122f. Dissertação (Mestrado Educação em Ciências) – Interunidades em Ensino de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

In this dissertation we present a study that aims, from a historical-cultural perspective, to outline a theoretical model for teaching electromagnetism. In order to achieve this conciliation between the historical-cultural perspective, the teaching of physics and electromagnetism, we used the theory of developmental teaching and the instruments it has to understand the use and formation of theoretical concepts and theoretical thinking. The theory created by Vigotski and expanded with important contributions from collaborators until culminating in a new object of analysis proposed by Davydov helped us in the search for a broader understanding of the teaching process. As motivation for this approach, we conducted a literature review on the teaching of electromagnetism through works published in the main national journals. In this review, we noted that attempts at dialogue between Davydov's theory and the teaching of physics are rare, and with the teaching of electromagnetism they are non-existent. Furthermore, we realize that the concepts of historical-cultural theory that underlie electromagnetism teaching practices are mainly related to the mediating role of the teacher. Subsequently, we delved into the logical and historical aspects of genesis and the development of important concepts for the current understanding of electromagnetism. From this, we were able to elaborate a synthesis of the essential concepts that structure the classic electromagnetic phenomena: movement, variation and interaction. Finally, we investigated a situation of analysis of these concepts, concretizing them in the generation, transmission and use of electric energy. The main conclusion of this work is a first proposition of a theoretical model. Finally we advocate the possibility of a dialogue between Davydov's theory and the teaching of Physics in general, and electromagnetism in particular, in order to promote theoretical thinking in students.

Keywords: Physics Teaching, Electromagnetism, Developmental Teaching, Davydov, Theoretical Concepts.

SUMÁRIO

Apresentação.....	11
1. Introdução.....	12
1.1. Da metonímia lendo a pesquisa pelo pesquisador.....	12
1.2. Uma notação importante: conceito TCU	14
1.3. O problema de pesquisa	18
1.4. Do caráter qualitativo da pesquisa	22
1.5. O contexto do ensino de eletromagnetismo	24
2. Revisão da literatura	26
2.1. A teoria de Davydov como referencial teórico no ensino de eletromagnetismo	27
2.2. Fundamentações teóricas no ensino de eletromagnetismo	28
2.3. Metodologia e análise dos periódicos	30
2.3.1. Resultados da revisão	32
2.3.1.1. Resultados específicos referentes à teoria histórico-cultural e ao ensino de eletromagnetismo	34
3. Referencial Teórico	37
3.1. O contexto da escola psicológica histórico-cultural.....	38
3.2. O ensino desenvolvimental	41
3.3. Considerações sobre essência e conhecimento teórico	44
3.3.1. Relação entre o conhecimento e o pensamento teórico	47
3.4. Síntese empírico x teórico: conceito, pensamento e generalizações	50
3.5. Da ascensão do abstrato para o concreto, do processo de análise e da lógica do conteúdo	54
4. Construindo um modelo teórico para o ensino de eletromagnetismo ..	59
4.1. Considerações históricas até Oersted	60
4.2. O eletromagnetismo no século XIX.....	63
4.3. Análise dos conceitos constituintes do modelo teórico	67
4.3.1. Movimento.....	67
4.3.2. Variação	69
4.3.3. Interação	71
4.4. Comentários sobre o modelo teórico	74
4.4.1. Por que “campo” não é um conceito TCU?	74
4.4.2. Lei de Gauss	76
Resumindo (...e Comentando...)	78

5. Pensando o modelo teórico: como tenho energia elétrica em casa? ...	88
5.1. Energia elétrica na cidade de São Paulo	89
5.2. Considerações do exemplo da energia elétrica	95
CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
REFERÊNCIAS.....	105

APRESENTAÇÃO

Ao longo dos últimos anos de estudo e pesquisa, apresento essa dissertação como síntese das reflexões e investigações que aprofundaram e ressignificaram meu olhar científico.

O primeiro capítulo contém uma breve apresentação e a cunhagem do problema de pesquisa, sua germinação e desenvolvimento, como ele está relacionado às visões pessoais de mundo do autor, e do sentido atribuído à formação da nova geração de estudantes. Embora haja pessoalidade na interpretação e atribuição de *problema* para aquilo que poderia ser considerado apenas como uma *questão*, tentamos evidenciar como o problema de pesquisa apresentado pode ser visto emaranhado a outras questões ligadas ao ensino de ciências e a outros problemas humanos.

No segundo capítulo, apresentamos uma revisão bibliográfica da literatura que nos ajudou a esclarecer quais são os referenciais teóricos que se utilizam para o ensino de eletromagnetismo, bem como a presença do referencial teórico da teoria histórico-cultural e da teoria do ensino desenvolvimental. Dada esta visão panorâmica da área, fomos capazes de ajustar nosso olhar para possíveis carências que circundam o problema de pesquisa.

No terceiro capítulo, evidenciamos as bases teóricas que fundamentaram este trabalho e que nos guiaram em direção a uma solução para o problema de pesquisa. Nosso percurso retrata o recorte social e histórico russo do século XX iniciando-se com a perspectiva sócio-histórico-cultural e aprofundado por Davydov com a teoria do ensino desenvolvimental, desdobramento psicopedagógico da teoria histórico-cultural.

No quarto capítulo, construímos um modelo dos conceitos teóricos do eletromagnetismo a partir da teoria de Davydov. Para isso, utilizamos de aspectos lógicos e históricos da gênese e do desenvolvimento da teoria eletromagnética. Reservamos uma seção ao fim do capítulo para resumir e comentar os principais pontos referentes a função e o processo do modelo teórico construído.

No quinto e último capítulo, discutimos uma situação concreta de análise para o modelo teórico elaborado no capítulo anterior. Escolhemos como objeto a energia elétrica, sua geração, transmissão e utilização pelo consumidor final.

Adendo a esta introdução destacamos o quão difícil foi investir em uma

dissertação de cunho teórico. Somadas às dificuldades das abstrações, esperadas dado o caráter conceitual dessa pesquisa, têm-se a dificuldade no uso da gramática como síntese hipercontextualizada da linguagem. Ou seja, a escolha de palavras que concretizasse as mais diversas abstrações e conceitos necessários para esta dissertação. É no fio dessa navalha que escrevo este trabalho.

1. Introdução

1.1. Da metonímia lendo a pesquisa pelo pesquisador

Na crença que a apreensão da totalidade da obra é impossível sem o conhecimento do autor é que destaco esta parte da introdução para apresentar parte de minha trajetória pessoal e acadêmica, na esperança que ajude na compreensão das crenças e pressupostos contidos neste trabalho.

Na primeira metade da graduação, quando as disciplinas cursadas eram referentes apenas à teoria em física e aos cálculos diferenciais, me via com a majoritária preocupação: qual é o resultado deste exercício? Qual o valor dessa integral? Para essas perguntas, as respostas eram únicas – embora não óbvias – e não havia debate, não haviam contradições. Eu poderia não saber a resposta, mas estava certo de que alguém sabia. Essa certeza era irreduzível, caso contrário, nem faria sentido a própria existência do exercício.

Posteriormente, com as disciplinas relacionadas ao ensino de Física na segunda metade da graduação e potencializado pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação à Docência (PIBID), estágio supervisionado onde atuava com escolas parceiras, um importante pensamento foi gradualmente tomando forma. Perguntas relacionadas ao ensino e a docência não apresentavam respostas únicas, não tinham valor numérico, e muito menos apareceriam em seção exclusiva ao final do livro. Eu literalmente sabia nada: não sabia as respostas, não sabia onde procurá-las e nem sabia se alguém as saberia previamente.

Onde havia ingênua certeza agora era inundado por dúvidas: como melhorar o ensino de ciências? O que é *melhorar*? Qual é o papel da educação escolar? E do professor? E o meu? Cada solução dava pé a uma nova questão, tão difícil quanto a precedente e que parecia descortinar outras mais, conduzindo a investigações ulteriores intermináveis. Paradoxalmente o buraco parecia mais escuro conforme mais luz entrava. Ricardo (2010, p.29), se

referindo ao ensino de física, bem descreveu minha angústia “como levar cada um dos alunos a se apropriar de algum conhecimento dentro de sua individualidade e, ao mesmo tempo, trabalhar com uma classe em que este mesmo aluno é um sujeito coletivo?”. Embora angustiado, não estava sozinho.

Durante este processo, estreitei o contato com o grupo de pesquisa em Educação em Ciências e Complexidade (ECCo). Neste grupo, fui apresentado à teoria histórico-cultural preconizada por Lev Semionovitch Vigotski¹ e colaboradores, e posteriormente aprofundada pelas próximas gerações de psicólogos e pedagogos da extinta União Soviética, até conhecer Vasily Vasilyevich Davydov¹, autor chave para esta dissertação. Pouco a pouco percebi que se eu quisesse ter uma séria indicação de resposta para qualquer uma das questões relacionadas às atividades de ensino de física, eu deveria ter conhecimento na área da física, psicologia, pedagogia, filosofia e da comunicação. O referencial teórico não poderia ser posto simplesmente como a “escola teórica histórico-cultural”, visto suas imensas ramificações, interpretações, debates, autores e escopos.

Por exemplo, Duarte (1996) apresenta pelo menos 5 diferentes posições para quem deseja se adentrar a uma leitura pedagógica da psicologia histórico-cultural; a saber: i) para se compreender o pensamento de Vigotski e sua escola é indispensável o estudo dos fundamentos filosóficos marxistas dessa escola psicológica; ii) a obra de Vigotski precisa ser estudada como parte de um todo maior, aquele formado pelo conjunto dos trabalhos elaborados pela Psicologia Histórico-Cultural; iii) a Escola de Vigotski não é interacionista nem construtivista; iv) é necessária uma relação consciente para com o ideário pedagógico que esteja mediando a leitura que os educadores brasileiros vêm fazendo dos trabalhos da Escola de Vigotski; v) uma leitura pedagógica escalonista dos trabalhos da Escola de Vigotski se contrapõe aos princípios pedagógicos contidos nessa escola psicológica. Nessa dissertação, implicitamente nos localizamos principalmente por ii), visto nossa acepção de ensino pautado na teoria desenvolvimental davydoviana.

Contudo, eu descreveria esse desejo insólito de dar um sentido a toda essa intrincada pesquisa científica consolidado no termo alemão

¹Os nomes Vigotski e Davydov são grafados de diferentes maneiras na bibliografia existente: Vigotski, Vygotsky, Vigotskii, Vygotski, Davýdov, Davydov, Davidov. Optamos pelas grafias Vigotski e Davydov para nos referirmos a L. S. Vigotski e V. V. Davydov, respectivamente, ao longo do texto. Preservamos na bibliografia a grafia presente nas obras referenciadas.

weltanschauung, sentimento de necessidade de conceber o universo em sua abrangência e da relação da humanidade com ele. Mesmo não vendo o fim do túnel, uma hora há de começar, como dizia o poeta espanhol Antonio Machado “caminante, no hay camino, se hace camino al andar”; agora a racionalidade indutiva me compelia a começar uma caminhada, a dar o primeiro passo e outro passo após este, seguindo uma trajetória sinuosa. Destarte, aqui inicio o primeiro passo com um montão de dúvidas e um montinho de certezas.

1.2. Uma notação importante: conceito TCU

Com a elaboração desse trabalho notamos que os termos *teórico* e *científico* são particularmente ambíguos e até mesmo confusos visto a ampla variedade de significados a que estão associados. Soma-se a essa complicação o fato que esses termos são utilizados em situações cotidianas e efetivamente fazem parte do vocabulário comum, apresentando riqueza semântica e multiplicidade de usos. Por exemplo, pensamos ser mais delicado apresentar uma definição de um termo já utilizado na linguagem cotidiana do que um termo próprio da ciência que é menos conhecido. Assim, é razoável supor que pessoas já ouviram ou leram expressões como *conceito científico*, *conhecimento científico*, *pensamento teórico*, etc., e possuem um entendimento próprio do que isso pode significar (mas que provavelmente difere do entendimento davydoviano). Por outro lado, termos também científicos como *linfócitos*, *férmions* ou *enantiômeros* não fazem parte das nossas práticas linguísticas cotidianas, e suas definições são consensuais e restritas a contextos bem específicos; sendo assim, em certo sentido, menos problemáticas de apresentá-las. Dedicamos essa seção apenas para acordarmos na linguagem utilizada ao longo dessa dissertação.

Na literatura que se refere aos trabalhos de Davydov, encontram-se e usam-se os adjetivos *teórico* e *científico* de maneira intercambiável, praticamente como sinônimos. Desse modo, vemos esses adjetivos caracterizando diferentes substantivos como *conceito*, *pensamento*, *conhecimento*.

Referindo-se à teoria do ensino desenvolvimental de Davydov, temos os seguintes exemplos: Borges (2016) utiliza tanto “conceitos científicos” (p. 60) quanto “conceitos teóricos” (p. 48). Também, Marengão (2011) se refere a “conceitos científicos (p. 30) e “conceitos teóricos” (p. 36). Lobo (2018) utiliza

os termos “conceitos teóricos científicos” (p. 28), “conceitos científicos” (p. 26) e “conceitos teóricos” (p. 29).

Saviani (1998) adota tanto “pensamento científico-teórico” (p. 69), conectando os termos *científico* e *teórico* com hífen, quanto também informa sobre o caráter sinonímico dos termos: “pensamento teórico, também denominado científico ou abstrato” (p. 77). Libâneo e Freitas (2017, p. 348) utilizam tanto de “pensamento teórico” quanto “pensamento teórico-científico”.

“Pensamento teórico” e “conhecimentos científicos” aparecem tanto em Rosa e Damazio (2017, p. 153) quanto Panossian, Moretti e Souza (2017, p. 149). Em Puentes e Longarezi (2013) encontramos o termo “pensamento teórico” (p. 249) e “conceitos científicos” (p. 254).

Em Davýdov (1982) encontramos tanto “pensamento científico” (p. 32) quanto “pensamento científico-teórico” (p. 8), além de “conceitos científicos-teóricos” ou apenas “conceitos científicos” (p. 76).

Em Davydov (1988a) temos tanto “pensamento teórico” (p. 127) quanto “pensamento científico” (p. 134) e “conceito teórico” (p. 133)².

Ademais, há exemplos como o encontrado em Nascimento, Araujo e Migueis (2016, p. 136, grifo nosso) na qual se diz que o trabalho educativo escolar deve transformar “o senso comum em *conhecimento científico*, o pensamento empírico em *pensamento teórico*”. Ao longo da leitura do material bibliográfico para essa dissertação, notamos que o trecho anteriormente citado transmitiria a mesma mensagem se a frase fosse reescrita como “[transformar] o senso comum em *conhecimento teórico*, o pensamento empírico em *pensamento teórico*” ou ainda “[transformar] o senso comum em *conhecimento científico*, o pensamento empírico em *pensamento científico*”, entre outras permutações dos termos destacados.

Conforme o exposto, notamos que a utilização dos termos *teórico*, *científico*, *científico-teórico* ou *teórico-científico* para caracterizar um tipo de *pensamento*, de *conhecimento* ou de *conceito* aparecem como sinônimos tanto nas obras de Davydov quanto em autores que escrevem a respeito da teoria do ensino desenvolvimental davydoviana. Não parece haver uma constância no sentido de: caso um(a) autor(a) tenha escolhido utilizar *teórico* para caracterizar, digamos, *conceito*, então ele/ela continuará com o mesmo adjetivo *teórico* para se referir também a *conhecimento* e *pensamento* (em vez de

² Desconhecemos trabalhos que fizeram uma análise parecida nos originais russos.

utilizar *conhecimento científico*, por exemplo). Como vimos, encontram-se trabalhos que, mesmo sempre se referindo à teoria do ensino desenvolvimental de Davydov, utilizam-se *teórico e científico* em diferentes momentos do texto para representar o mesmo significado quando atribuídos a *conceito*, *pensamento* ou *conhecimento*.

Isso talvez não fosse um problema caso autores que se apropriam do referencial da teoria histórico-cultural vigotskiana também utilizassem da expressão “*conceito científico*” (DANIELS, 2018, p. 38; VYGOTSKY, 1987, p. 167; WERTSCH, 1985, p. 102) sob exatamente o mesmo sentido imposto por Davydov, o que não parece ser o caso no ensino de Física. Do nosso ponto de vista, a problemática se desenvolve pois *conceitos científicos* em trabalhos de ensino de Física que utilizam do referencial teórico de Vigotski, não necessariamente seria um *conceito científico* segundo nossa interpretação³ das obras de Davydov.

A razão que principalmente nos interessa entre a diferenciação dos *conceitos científicos* em Vigotski e dos *conceitos científicos* em Davydov é que para Vigotski, conceitos científicos são aqueles “aprendidos na escola” (HOWE, 1996, p. 38) através de análise sistemática e hierarquizada de relações. Gaspar e Monteiro (2005, p. 231) apontam que Vigotski “classifica como conceitos científicos todos os conceitos aprendidos na educação formal”.

Desse modo, alguns autores que utilizam do referencial teórico vigotskiano se referem e caracterizam *conceitos científicos* como sendo: pressão atmosférica (GASPAR; MONTEIRO, 2005); corrente alternada (ERTHAL; GASPAR, 2006); motor elétrico (MONTEIRO et al., 2010); circuitos elétricos (PAULA; TALIM, 2012); eletroímã, circuitos elétricos e materiais condutores (BOSS et al., 2012), apenas para citar alguns.

Davydov (1990) também concorda que *conceitos científicos* são aqueles aprendidos através de uma educação formal própria (com o auxílio do professor e em uma determinada organização da atividade de ensino, por exemplo). Porém isto não é suficiente. Na corrente teórica davydoviana do ensino desenvolvimental, é explicitado que os *conceitos científicos* são

³ Enfatizamos “nossa interpretação” pois desconhecemos trabalhos nos quais Davydov tenha escrito ou utilizado exemplos próprios da Física; portanto seria inadequado afirmar que **Davydov** diria que corrente alternada *não é um conceito científico*, por exemplo. De todo modo, estamos simplificando o argumento. É necessário uma análise para verificar como corrente alternada expressaria a dimensão teórica no eletromagnetismo.

necessariamente *universais*, isto é, apresentam *universalidade*⁴, no sentido de estarem presentes em todos os casos concretos (DAVÝDOV, 1982; DAVÝDOV, 1990). O termo *universalidade*, na literatura davydoviana, é sinônimo de outros termos como “geneticamente primário, relações essenciais, relações básicas” (CHAIKLIN, 1999, p.191-192, tradução nossa)⁵. Davydov (1990, p. 7, tradução nossa) coloca que “‘conceitos’ significam não apenas um grupo de atributos comuns, mas um grupo de atributos *essenciais comuns*”⁶.

Essa importante característica (chamada de relações *universais* ou *primárias* ou *essenciais* ou *básicas* ou *centrais*) é fundamental para Davydov, e guiará a nossa investigação sobre quais podem ser as relações *universais* no contexto do ensino de eletromagnetismo e permitirá a construção de um modelo teórico, como será discutido mais adiante em momento oportuno. Por fim, veremos que os exemplos encontrados na literatura como circuitos elétricos, materiais condutores ou corrente alternada não formarão nosso modelo teórico; portanto, não os consideramos *conceitos científicos* davydovianos segundo nossa interpretação.

Vale ressaltar que *conceito científico* é particularmente complicado de se delinear no contexto da Física. Por exemplo, se é utilizado como base Astolfi e Develay (1990, p. 30), alguém poderia dizer que o eletromagnetismo é uma ciência que apresenta conceitos de 3 naturezas distintas: *científica* (campo magnético), *linguística* (ímã) e *matemática* (diferencial).

Ademais, é comum encontrarmos físicos falando algo como “energia é um conceito teórico”, o que é semelhante da fala de senso comum “eu não entendo eletromagnetismo porque só tem conceitos teóricos”. Note que nessas falas *teórico* é apenas no sentido de *abstrato*.

Elementos que caracterizam um conceito *científico* (ou *teórico*) na concepção davydoviana será discutida em detalhes no capítulo 3. Nesse momento da *Introdução*, estávamos apenas preocupados com a delimitação do

⁴ O termo “universalidade” em Davydov está intimamente relacionado à “essência”, que possui base na lógica dialética de Hegel. Segundo Davydov (1990, p. 135) “*in dialectical logic the concept of essence is of the same degree as the concepts of law and universality. To know essence means to find the universal as a base, as a single source for a variety of phenomena, and then to show how this universal determines the emergence and interconnection of phenomena – that is, the existence of concreteness*”. Devida atenção a essas considerações são feitas ao longo do capítulo 3, o importante nesse momento é: “universalidade” existe como *uma relação* entre formas reduzidas individuais com a essência.

⁵ “*The ideal is that pupils work with the genetically primary, universal, essential relationship [...] subject matter analysis will aim to identify the basic relationships*” (CHAIKLIN, 1999, p.191-192).

⁶ “*To be sure, one usually means by a ‘concept’ not just a group of common attributes, but a group of essential common attributes*” (DAVÝDOV, 1990, p. 7).

significado, e nosso intuito foi de esclarecer uma terminologia que, para leitores não acostumados com a literatura da área – como éramos no começo do estudo para esse trabalho – pode ser confusa e não evidente.

Diante dessa interpretação ambígua entre vigotskianos, davydovianos e o senso comum no que o termo *conceito científico* pode se referir, sentimos a necessidade de sugerir uma nova grafia: **conceito TCU** (abreviação para *conceito teórico-científico-universal*)⁷ para **nos referirmos aos conceitos científicos em sentido davydoviano**. Esta nova grafia foi o recurso que encontramos para colocar a linguagem sob um denominador comum, evitando ambiguidades.

O que precisa ficar claro dessa introdução é: sempre que escrevermos *conceito TCU*, estaremos nos referindo a *conceitos científicos em sentido davydoviano*. Nos demais casos que utilizarmos a expressão *conceitos científicos*, estes ficarão claros pelo contexto (no sentido de *abstrato*, ou de *origem científica*).

Deste momento em diante, utilizaremos o único adjetivo *teórico* para nos referirmos aos termos davydovianos: **conhecimento teórico** e **pensamento teórico**. As outras grafias possíveis e equivalentes tais como, *pensamento teórico-científico*, *pensamento científico*, *conhecimento científico*, *conhecimento científico-teórico*, serão mantidas apenas em citações.

1.3. O problema de pesquisa

Autores pioneiros na criação e fundamentação da teoria histórico-cultural, como Vigotski, Luria e Leontiev, não tinham como objetivo primeiro a elaboração de uma teoria do ensino. Suas preocupações em pesquisa se concentravam na elaboração de uma teoria psicológica para a compreensão dos processos de desenvolvimento e aprendizagem a partir do estudo das *funções psíquicas superiores*. Também chamadas de *funções psicológicas superiores*; essas se referem às capacidades intelectuais tipicamente humanas como abstrair, generalizar, planejar, fantasiar, entre outras, utilizando signos, símbolos e diferentes sistemas semióticos – mediados pela linguagem – e construídos cultural e historicamente (VIGOTSKI, 2002; FACCI; TULESKI,

⁷ É evidente que permutações das palavras não alteram o significado. Seria igualmente válido utilizar conceitos TCU, TUC, CTU, UTC, etc. Embora em termos davydovianos seja redundante escrever conceito *científico* (ou *teórico*) e *universal*, optamos por deixar explícito no nome as 3 iniciais T, C e U.

2006; TOSTA, 2012). Duarte (2016, p. 38) explicita o caráter a priori da existência dessas funções psicológicas dentro dessa corrente teórica: “todos os pesquisadores, psicólogos e educadores que trabalham na linha da psicologia histórico-cultural [...] partem do pressuposto de que existe o desenvolvimento psíquico”.

Assim, coube a outros autores soviéticos a tarefa de se adotar as concepções estabelecidas por Vigotski e colaboradores de tal maneira a incorporá-las nas mais variadas linhas de pesquisas (REGO, 2017). Desse modo, o problema de pesquisa apresentado neste trabalho possui um recorte teórico específico, a abordagem do “ensino desenvolvimental”⁸ elaborada por Davydov e colaboradores.

Contudo, para sermos capazes de verdadeiramente compreender o problema de pesquisa, faz-se necessário um esclarecimento sobre nossa visão de educação escolar. Concordamos com Baldwin (1963) que há muito já alertava professores que o propósito da educação é desenvolver na pessoa a habilidade de olhar para o mundo criticamente, além de ser capaz de tomar suas próprias decisões na sociedade.

Assim, a escola passa a ser um lugar cultural de formação, no qual a aprendizagem é fruto do trabalho do mundo sobre si mesmo (BARBOSA; BULCÃO, 2011) com o papel de “prover aos alunos a apropriação da cultura e da ciência acumulada historicamente, como condição para seu desenvolvimento cognitivo, afetivo e moral” (LIBÂNEO, 2012, p.25 apud PANOSSIAN; MORETTI; SOUZA, 2017, p.125). O que culmina em uma função central da escola: o duplo papel de servir como fonte de informação e de organizar a atividade cognoscitiva dos alunos (SAVIANI, 1998, p. 9). Ou seja, uma função da educação escolar “deve ser a mudança na personalidade viva dos estudantes, na direção da constituição de neoformações psicológicas e do **desenvolvimento do pensamento teórico**” (PIOTTO; ASBAHR; FURLANETTO, 2017, p. 101, grifo nosso).

Evidentemente muitos outros autores agregam e alimentam essas e outras concepções de educação escolar; contudo, nosso intuito foi, sem as opor, estabelecer um denominador comum: a partir de princípios da psicologia

⁸Libâneo e Freitas (2017, p. 332) nos informam que o termo “ensino desenvolvimental” é o termo para a tradução de *developmental teaching*, que aparece na tradução do russo para o inglês da obra *Problems of developmental teaching* de Davydov, 1988. Corresponde ainda à tradução de *enseñanza desarrollante*, termo utilizado na tradução do russo para o espanhol.

histórico-cultural temos que a educação escolar deve, entre outros fatores, se preocupar com a formação de funções psicológicas superiores. Mas nos referimos a alguma em particular? Longarezi e Puentes (2017) contribuem para a discussão:

A teoria marxista, a psicologia histórico-cultural e a didática desenvolvimental afirmam que o verdadeiro papel da escola é o de criar um tipo específico de orientação pedagógica que permita desenvolver no aluno aquilo que fora dela não teria condições de desenvolver: **o pensamento teórico**. De modo que a função da escola é desenvolver no aluno as funções mentais superiores que o tornam humano tendo como foco o pensamento teórico, pela via da formação dos conceitos científicos e das ações mentais (LONGAREZI; PUENTES, 2017, p. 22, grifo nosso).

Tanto Davydov, formado em Filosofia e Psicologia pela Universidade Estadual de Moscou quanto seu orientador, Piotr Galperin, psicólogo reconhecido por sua teoria da formação das ações mentais e os conceitos por etapas, trabalharam com a problemática do desenvolvimento e domínio do pensamento teórico. Núñez e Oliveira (2017, p. 309) destacam que “Galperin objetivava organizar e estruturar o ensino de forma tal que favorecesse a aprendizagem de conceitos teóricos e científicos com o potencial para o desenvolvimento do pensamento teórico das crianças”.

Contudo, seria ao longo da parceria de Elkonin com Davydov que “Davydov foi formalizando, por volta de 1970, a teoria do ensino desenvolvimental, muitos a chamaram de nova etapa da teoria da atividade” (LIBÂNEO; FREITAS, 2017, p. 336).

Com a teoria do ensino desenvolvimental, Davydov discute a complexa rede de fatores que caracterizam uma organização de ensino que almeje formar nos estudantes o pensamento teórico. A esse respeito, Davýdov (1982) destaca questões nas áreas filosófica-sociológica, lógica, psicológica e pedagógica:

A solução para esse problema [de formar o pensamento teórico] tem vários aspectos. Assim, questões **filosófico-sociológicas** passam a se destacar sobre a natureza comum do processo criativo e assimilador da cultura humana pelos indivíduos, e sobre a mudança histórica nas formas de tal assimilação. Depois vem o problema da estrutura **lógica** do pensamento científico atual e métodos para sua descrição e estudo. O terceiro grupo de perguntas diz respeito ao aspecto psicológico do problema e, acima de tudo, ao relacionamento de formas genéricas de pensamento com atividade intelectual do indivíduo, às condições e qualidades formativas de sua atividade mental de acordo com as possibilidades do pensamento contemporâneo. Inseparável de tudo isso, está a faceta **pedagógica**, a elaboração de uma ‘tecnologia’ concreta de ensino que torna uma interpretação ou outra realidade da natureza muito assimilativa da cultura social pela homem individualizado. Somente *na presença de*

interconexão desses aspectos fundamentais pode ser resolvido efetivamente e conseqüentemente o problema de harmonizar o conteúdo e métodos de ensino com avanços científico-técnicos contemporâneos (DAVÝDOV, 1982, p.5-6, tradução nossa, grifos do autor).

Nessa dissertação, nos dedicamos ao estudo da estrutura lógica do conteúdo e de seus conceitos TCU, nos preocupando em encontrar as bases – ou os “núcleos relativamente estáveis” (SAVIANI, 1998, p. 53) – do eletromagnetismo clássico⁹.

Uma vez que partimos do entendimento que a educação escolar deve promover o pensamento teórico nos alunos, e que este é construído a partir da manipulação e utilização dos conceitos TCU pelos estudantes, cunhamos o problema de pesquisa: **quais podem ser os conceitos TCU no contexto do ensino de eletromagnetismo? Em outras palavras, quais podem ser as relações conceituais que permitem expressar os conteúdos teóricos no ensino de eletromagnetismo?** Essa é a pergunta que este trabalho tenta responder.

Suponhamos a seguinte situação hipotética para contextualizar a pergunta de pesquisa: imaginemos um diálogo entre dois jovens, João e Maria, que gostam de pássaros. Em um momento de descontração no parque, Maria se questiona sobre o que faz os pássaros serem pássaros. De partida, ela assume que sempre há “coisas” – o que na linguagem técnica chamamos de modelo teórico formado pelos conceitos TCU – que estão presentes em todos os fenômenos, e isso não seria diferente para os pássaros. João oferece uma sugestão: vamos observar todos os pássaros e então poderemos dizer o que faz os pássaros serem pássaros, chegaremos em uma “*passaridade*”.

Maria entende o ponto de João e juntos eles começam a anotar tudo que conseguem observar nos pássaros: penas, asas, bicos, etc. Durante esse processo, eles encontram embaixo de uma árvore alguns trechos traduzidos do *Dialectical Logic: Essays on its history and theory*, escrita por Ilyenkov:

O universal pode ser externamente expressado muito melhor na forma de diferenças, mesmo opostas, que fazem os fenômenos separados se complementarem, componentes de um todo, de algo

⁹ Tal como Bezerra (2006), utilizamos o termo “clássico” para nos referirmos ao eletromagnetismo não-quântico. Também, vemos que é comum em livros didáticos a divisão do conteúdo do eletromagnetismo em diferentes “frentes” tais como eletrostática, eletrodinâmica, magnetostática, eletromagnetismo e radiação. A partir desse momento nessa dissertação, quando utilizarmos o termo “eletromagnetismo”, estaremos utilizando-o de forma ampla, a fim de englobar todas essas separações didáticas. Casos específicos serão explicitados apropriadamente.

real, um agregado orgânico, e não como uma amorfa pluralidade de unidades postas juntas na base de mais ou menos atributos [...] por outro lado, o universal, que se manifesta precisamente nas particularidades, nas características individuais dos componentes do todo sem exceção, também existe juntamente a outros individuais derivados dele [...] O geneticamente entendido universal não simplesmente existe, naturalmente, no plano abstrato, nos elementos das palavras e ideias, e sua existência de maneira alguma desdenha a realidade de suas modificações nas características singulares que dele derivam e que dele dependem (ILYENKOV, 1977, p.115, tradução nossa).

Vendo a expressão confusa de João, Maria coloca em suas palavras: há uma crítica nesse trecho sobre o que estávamos fazendo. Mesmo reconhecendo que a universalidade, no caso a “passaridade”, se manifestará em cada um dos pássaros que vemos, não é através da análise do desmembramento de características que selecionamos como penas, asas e bicos que vamos chegar a uma “passaridade”. A “passaridade” existe como forma do particular e do individual, como uma relação entre a forma reduzida “penas” com a universalidade “passaridade”. A análise deve incidir sobre as condições de possibilidades das relações que permitem a existência dos pássaros. João, ainda intrigado, questiona: e que condições e conexões são essas? Maria responde triste, mas motivada: não sei...o texto não fala. Parece que teremos que descobrir por nós mesmos no processo de investigação.

Com isso, nessa dissertação, realizamos uma investigação sobre o que pode vir a ser uma “*eletromagnetividade*”. Essa análise foi composta por três pilares: **o contexto do ensino de eletromagnetismo** (presente no capítulo 1, e aprofundado no capítulo 2); **a teoria do ensino desenvolvimental** (presente no capítulo 1, e aprofundada no capítulo 3); **a construção dos conceitos TCU formando um modelo teórico, e um olhar para o uso desse modelo no ensino de eletromagnetismo** (síntese dos dois pilares anteriores, e aprofundado nos capítulos 4 e 5).

1.4. Do caráter qualitativo da pesquisa

Tendo em vista o problema de pesquisa que norteia este trabalho, optamos pela grande área da metodologia qualitativa de análise. Segundo Soares (2015, p. 35) esse modelo de investigação em pesquisas nas áreas das Ciências Humanas “emergiu sob os aspectos da fenomenologia e do marxismo, adotando metodologias qualitativas para abordar os temas de pesquisas da área”.

Conforme descrito por Taylor, Bogdan e DeVault (2015, p.7), “a frase *metodologia qualitativa* se refere em senso amplo a pesquisa que produz dados descritivos – produção escrita ou falada de comportamentos observados”. Destacamos, como observado em Bogdan e Biklen (1992) que os dados em uma pesquisa qualitativa se baseiam em palavras ou figuras, objetos predominantes na nossa investigação sobre a formação do pensamento e aquisição do conhecimento.

Desse modo, ao nos dedicarmos a esta prática metodológica almejamos em última instância “[...] compreender o processo mediante o qual as pessoas constroem significados e descrever em que consistem estes mesmos significados” (MACEDO; SILVA, 2010, apud BOGDAN; BIKLEN, p.10). Diante do exposto, a opção teórica tomada em nossa análise busca parâmetros que possibilitem assimilar os fenômenos a partir da dimensão humana, cultural e histórica de formação de conceitos eletromagnéticos.

Contudo, salientamos que o termo *metodologia qualitativa* foi generalizado, em certo sentido homogeneizado, desde suas primeiras concepções, sendo utilizado por vezes sem a devida criticidade em muitas pesquisas na área da Educação. Cedro e Nascimento (2017) reforçam que a metodologia qualitativa é mais do que um arsenal de técnicas e métodos de análise, ela também possui métodos de investigação própria e por isso essa abordagem metodológica configura-se também como uma abordagem teórica. Desse modo, a metodologia qualitativa não deve ser utilizada negligentemente como sinônimo ou como base inteiriça para pesquisas com pilar na teoria histórico-cultural. Nas palavras dos autores, a teoria histórico-cultural:

Apresenta princípios e fundamentações filosóficas bastante distintas das propostas pela metodologia qualitativa. A Teoria Histórico-Cultural tem, ela própria, o seu método de investigação, que apresenta como seu fundamento o método filosófico materialista histórico e dialético [...] embora uma pesquisa fundamentada na Teoria Histórico-Cultural (e, portanto, no materialismo histórico-dialético, como método filosófico) possa se valer de técnicas investigativas como a entrevista, a observação de campo ou a análise de documentos, isso não quer dizer que o investigador esteja se valendo do *método investigativo* proposto pela metodologia qualitativa (CEDRO; NASCIMENTO, 2017, p. 24-25).

Assim, a simples metodologia qualitativa que tem por intuito a descrição e compressão da realidade passa a ser uma tarefa hercúlea do ponto de vista marxista, visto que para Marx “a realidade é algo que se apresenta de maneira caótica” (COVER, 2010, p. 164). É preciso que o pesquisador se atente e

apreenda a essência do objeto de análise, que capturamos sua estrutura percebida em seu movimento histórico, em sua totalidade. Cedro e Nascimento (2017, p. 25) em caráter de síntese comentam “fundamentar-se nos conceitos elaborados pela Teoria Histórico-Cultural significa fundamentar-se em todas as dimensões desses conceitos: epistemológica, lógica/filosófica e ontológica”.

Por conseguinte, vemos que a metodologia ao envolver a reflexão, análise e a mobilidade dos conceitos na história social, justifica nossa opção de tratamento metodológico em razão do tema abordado neste trabalho. Isto posto, realizamos um estudo que se caracteriza majoritariamente como qualitativo. Como fontes de investigação, realizamos tanto uma revisão da literatura quanto utilizamos textos históricos do desenvolvimento do eletromagnetismo.

1.5. O contexto do ensino de eletromagnetismo

Sabemos que no século XXI, principalmente em áreas urbanas e industrializadas, há uma imensa quantidade de aparelhos que funcionam graças à utilização da energia elétrica, e a curiosidade dos alunos em entender como que aparelhos elétricos funcionam é explícita (SILVA, 2013). A atividade humana necessita, reproduz e se transforma com o uso de uma variedade de aparelhos eletrônicos como computadores, celulares, televisores, forno de microondas, entre muitos outros. Os estudantes, nascidos e criados nessa era digital, acabam interagindo com diferentes materiais que envolvem eletricidade e Rocha (2001) manifesta que parte dos estudantes sente necessidade de relacionar a ciência que aprende nas escolas com o mundo natural e tecnológico que o rodeia.

Assim, como fruto da intelectualidade humana de desenvolver pensamento racional, lógico e histórico sobre os objetos ao nosso redor, concordamos com Gilbert, Boulter e Rutherford (1998) quando dizem que os alunos acabam por construir seus próprios modelos mentais de representação de interpretação desses objetos e dos fenômenos que os governam. A compreensão de suas manifestações é importante para a inserção crítica no contexto tecnológico atual (PIEPER; NETO, 2015) uma vez que temos a tecnologia como um dos assuntos que mais parecem despertar o interesse nos jovens (BARAM-TSABARI; YARDEN, 2005; CHRISTIDOU, 2006).

Contudo, um estudo sistemático dos fenômenos elétricos e magnéticos apresenta grande dificuldade para a compreensão por parte dos alunos, o que acaba acarretando em uma baixa apreciação teórica dos seus fenômenos (SILVA, 2012). Parte do problema do ensino de física encontra-se na banalização dos conceitos e na metodologia utilizada (BOSS; FILHO; CALUZI, 2009) na qual muitas vezes é apenas uma leitura e transcrição do livro didático. Alguns autores sugerem que a aprendizagem seria significativa caso a física fosse abordada com mais ênfase em seus conceitos e menos em matematização (BRAGA; TEIXEIRA, 2006; PAZ, 2007).

Segundo Casperson e Linn (2006) os estudantes apresentam dificuldade em temas como eletrostática, pois em geral eles apresentam ideias e experiências desconectadas das esferas macroscópica e microscópica relacionadas ao mesmo fenômeno, enquanto físicos tendem a integrar ambas perspectivas para a compreensão do fenômeno investigado. Além da eletrostática, Colin e Viennot (2001) mostram que o entendimento conceitual do comportamento ondulatório da luz é de difícil assimilação mesmo entre estudantes universitários.

Complementar aos tópicos trabalhados pelos autores citados anteriormente, temos ainda Stocklmayer (2010) que diz que alunos de vários graus de instrução acadêmica carecem de entendimento profundo a respeito do modelo físico de corrente elétrica e movimento de elétrons. Ainda neste tema, Scarinci et al. (2009) em uma experiência didática de demonstração da condução e geração da corrente elétrica, percebem que os alunos apresentaram bastante dificuldade na interpretação do que ocorre no interior do fio, da pilha e da lâmpada, pois para isto exige a imaginação de uma entidade atômica não diretamente observável.

Sağlam e Millar (2006) ao investigarem o entendimento do eletromagnetismo por estudantes dos anos finais do ensino médio apontaram que:

Uma parte significativa da pesquisa em educação em ciências desenvolvida nos últimos 30 anos tem focado na identificação e documentação das ideias que os estudantes desenvolvem antes de serem ensinados sobre um tópico, ou como resultado de uma atividade de ensino, e que estes diferem das ideias aceitas cientificamente [...] **todos esses estudos concluem que eletromagnetismo não é bem compreendido por muitos estudantes.** Alguns estudantes são capazes de lembrar algumas ideias específicas, **mas poucos parecem possuir uma perspectiva integrada ou podem demonstrar seu entendimento através da**

aplicação dos conceitos em novas situações (SAĞLAM; MILLAR, 2006, p. 543-545, tradução e grifo nosso).

Diante do exposto, vemos que um dos principais responsáveis, apontados tanto por parte dos estudantes quanto dos professores, é o caráter abstrato – *abstrato* no sentido do senso comum – dos conceitos inerentes ao eletromagnetismo.

Como sabemos, muitos professores utilizam o livro didático como principal subsídio dentro da sala de aula. Os livros didáticos, para muitos, deixam de ser uma referência e passam a ser adotados *ipsis litteris* pelos educadores em suas aulas, constituindo um dos mais importantes elementos do processo de ensino-aprendizagem (MATTOS, 2016).

Vemos nos manuais didáticos uma enorme gama de conceitos, situações, leis, definições e fenômenos que expressam o eletromagnetismo. Neste momento, podemos nos questionar se realmente todo o material presente no livro didático é necessário para a compreensão da natureza eletromagnética da radiação, da matéria e de seus instrumentos quando propomos um ensino básico de Física. Isto posto, justifica-se a busca por uma prática pedagógica que amplie a apropriação dos conceitos fundamentais que expresse a lógica dos conceitos TCU.

2. Revisão da literatura

Neste capítulo apresentamos pontos relevantes que constituem o pano de fundo no qual o contexto do ensino do eletromagnetismo vem sendo desenvolvido. Ao tomarmos o ensino de eletromagnetismo como amplo e complexo, sentimos a necessidade de primeiro procurar por pesquisas relevantes que já trataram deste tema apontando tendências e características, e que nos ajudarão a resolver, ou ao menos esboçar caminhos para a análise do problema de pesquisa.

Para tanto, realizamos uma revisão da bibliografia em algumas das principais revistas científicas, que nos ajudaram a construir um panorama geral sobre o que tem sido publicado nos desde os anos 2000 em relação ao ensino de eletromagnetismo. Assim, com a revisão da literatura, pretendemos entender quais foram os referenciais teóricos que os pesquisadores utilizaram para elaborar estratégias de ensino ou para expressar os conceitos do eletromagnetismo que auxiliassem os alunos a compreenderem conceitos do

eletromagnetismo. Não nos restringimos a buscar apenas por trabalhos que investigassem um conceito em particular, mas sim qualquer conceito que os pesquisadores julgaram pertinentes o suficiente para serem trabalhados em sala de aula e posteriormente relatados em uma publicação de periódico.

Acreditamos que estes dados puderam nos encaminhar na análise das perguntas anteriormente levantadas sobre a possibilidade de utilização da teoria do ensino desenvolvimental para elaboração de um modelo teórico visando o ensino de eletromagnetismo.

2.1. A teoria de Davydov como referencial teórico no ensino de eletromagnetismo

O objetivo dessa parte da revisão foi: encontrar artigos, trabalhos em anais de eventos, dissertações ou teses nos quais apresentem o referencial teórico do ensino desenvolvimental de Davydov para elaboração de uma proposta didática, ou uma delineação dos conceitos TCU no contexto do ensino de eletromagnetismo. O resultado: não encontramos¹⁰.

Não encontramos trabalhos que tenham utilizado de pressupostos davydovianos para uma discussão a respeito dos conceitos TCU do eletromagnetismo. Assim como, partindo dos conceitos TCU, como elaborar uma proposta didática para ensino de eletromagnetismo. Esses resultados talvez reflitam que a busca entre uma da teoria de Davydov com o ensino de eletromagnetismo ainda seja pouco difundida ou inédita.

Também procuramos por trabalhos que apresentassem uma **construção dos conceitos TCU de qualquer disciplina da Física** (ótica, termodinâmica, mecânica, quântica, eletromagnetismo, hidrodinâmica, etc.) e encontramos apenas a dissertação de Marengão (2011) e a tese de Borges (2016) que relacionam elementos da teoria de Davydov com tópicos da mecânica clássica em um experimentos didáticos. Desse modo, ampliamos o escopo da revisão de forma que incluísse: **o ensino de eletromagnetismo a partir de qualquer referencial teórico** (demos especial atenção àqueles referenciais que se relacionam à teoria histórico-cultural, que compartilha pressupostos com a teoria do ensino desenvolvimental de Davydov)¹¹.

¹⁰ Procuramos nos principais bancos de dados de revistas científicas (SciELO, Web of Science, ERIC e Google Scholar) em português, inglês e espanhol.

¹¹ Bonfim, Solino e Gehlen (2019) ao analisarem a presença de pressupostos da teoria histórico-cultural em resumos de dissertações e teses da área de Educação em Ciências entre

2.2. Fundamentações teóricas no ensino de eletromagnetismo

Por que nos preocuparmos com a presença de referenciais teóricos e conceitos TCU para embasar as práticas de ensino de eletromagnetismo ou para embasar a busca de um modelo teórico para seu ensino? Se os conceitos são abstratos, por que não apenas levar experimentos para sala de aula ou apresentar vídeos e simulações usando a tecnologia a favor do professor?

Porque, além de enxergarmos que referenciais teóricos podem contribuir com a potencialidade do professor de buscar por concepções que o ajudem a refletir relação conteúdo-ensino-aluno, também concordamos com Gaspar (1997, p. 11) ao afirmar que “não é possível acreditar que [...] observando um bastão atritado com um lenço atrair papeizinhos alguém possa, sem conhecimento teórico prévio, concluir que o lenço cedeu ou tirou elétrons do bastão, este polarizou eletricamente os papeizinhos e assim os atraiu” e “só quem conhece a fundamentação teórica de uma experiência pode realizá-la de forma significativa e fazer com que ela possa promover a aquisição do conhecimento para a qual foi proposta e apresentada”.

No campo do uso de atividades experimentais, Monteiro, Monteiro, Germano e Gaspar (2010, p. 372) comentam que é preciso, por parte dos professores, não apenas a apresentação de atividades de baixo custo ou de fácil construção, mas também “indicações de abordagem didática que explore amplamente todas as potencialidades do recurso à disposição”.

Resende e Fireman (2014) apontam que embora o uso de atividades experimentais seja uma abordagem a ser considerada para superação de uma educação engessada em modos tradicionais, a demonstração experimental não é, por si só, promotora de uma pedagogia crítica.

De modo semelhante, Paula e Talim (2012), em uma revisão bibliográfica acerca do uso de ambientes virtuais e outros recursos midiáticos, apresentam dados suficientes para argumentarmos que há consenso a respeito da importância e os benefícios do uso de recursos tecnológicos em sala de aula por parte da comunidade científica. Ainda sobre essa revisão de Paula e Talim, Paula (2017) comenta que pesquisas científicas deveriam explicitar os

1972 e 2016, observaram que este referencial teórico aparece em 343 de 10.017 trabalhos (note que esse resultado inclui os ensinamentos de Biologia, Química e Física. Não encontramos uma revisão bibliográfica centrada apenas na relação da teoria histórico-cultural e o ensino de Física, ou do ensino de eletromagnetismo – sendo esta última o que descreveremos aqui).

fundamentos pedagógicos que sustentam o uso dos recursos midiáticos, em vez de revalidar a justificativa do uso dessas tecnologias em salas de aula. Além disso, a utilização de meios digitais implica uma reestruturação da ação docente na qual o foco é o aluno e as diferentes formas de aprendizagem (SIQUEIRA; TORRES, 2010) descritas em diferentes referenciais teórico-metodológicos. A utilização de recursos tecnológicos em sala de aula sem uma concepção de como o aluno aprende pode ser erro metodológico (ARAUJO; VEIT, 2004).

Assim, embora haja consenso sobre os aspectos positivos da inserção de recursos da tecnologia de informação e comunicação (TIC) no ensino de ciências, sua utilização deve ser especificamente planejada e estudada (OSBORNE; HENNESSY, 2003).

Neste contexto, notamos a importância de integrar objetivos, métodos e práticas de ensino de conhecimentos científicos em uma investigação elaborada e desenvolvida pelo professor para que todos os agentes, pesquisadores, professores e alunos sejam protagonistas no processo de aprendizagem (FREIESLEBEN; LODER; BECKER, 2017).

A estruturação, articulação e análise dos dados provenientes dessas atividades poderiam ser feitos à luz de referenciais teóricos dos diversos campos da educação. Araujo e Veit (2004) apontam que

o desenvolvimento instrucional deve estar acoplado à pesquisa em ensino ou, pelo menos, levar em conta o conhecimento produzido pela pesquisa em ensino e os enfoques teóricos sobre aprendizagem compartilhados pela comunidade de educadores e pesquisadores em Ensino de Física (ARAUJO; VEIT, 2004, p.12).

Investigações anteriores também se propuseram a investigar a presença de referenciais teóricos em trabalhos relacionados ao ensino de ciências. Damasio e Peduzzi (2018, p.6) ao analisarem 8 teses e 33 dissertações entre o período de 2005 e 2014 apontam “no que se refere ao referencial educacional, 63% não declararam seu embasamento. Em relação ao aporte epistemológico, 34% também não se referiram à sua fundamentação”. Greca, Costa e Moreira (2002, p.63) investigaram 161 trabalhos do III Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências e concluíram que em 52 trabalhos “não é apresentada uma fundamentação teórica que possa ser considerada como tal”.

Pontone Junior e Paula (2015, p. 4) investigaram artigos publicados nos principais periódicos de ensino de ciências e física entre 2009 e 2014 e

constataram que “na maior parte dos artigos analisados, não encontramos menções explícitas ao referencial teórico adotado na pesquisa ou ao referencial teórico que orienta o uso desses recursos em sala de aula”. Pontone Junior e Paula (2015) estavam interessados em trabalhos que abordassem o uso, no ensino de ciências, de animações, simulações e laboratórios virtuais e como resultados apresentam que “apenas 9 dentre as 32 pesquisas empíricas apresentaram reflexões acerca das bases teóricas para o ensino de ciências mediado por ambientes virtuais”.

Uma vez que consideramos que a ação docente no ensino de ciências deve estar para além de uma mera transmissão de conhecimento, ela deveria contemplar uma aprendizagem que dialogue com as experiências e saberes dentro do contexto social e cultural dos estudantes. cremos que dentro da esfera educacional, recursos e métodos utilizados para o planejamento de atividades didáticas poderiam ser estruturados a partir de concepções de ensino-aprendizagem com alguma fundamentação teórica do campo da psicologia da educação ou das teorias de ensino, por exemplo. Em outras palavras, para ganhos significativos na aprendizagem não basta apenas realizar atividades práticas, é preciso que os alunos realizem tarefas que estimulem a reflexão e o raciocínio com auxílio do professor (HAKE, 1998; QUINTAS; CARVALHO, 2016) e que estas tarefas estejam em contexto do ponto de vista do estudante (GASPAR, 1997).

Em síntese, temos razões para argumentar que, a partir de um referencial teórico, a atividade didática ganha sentido, e o professor pode compreender a interface entre a atividade de ensino concebida dentro do objetivo escolar, e a importância de sua prática social como mediador do aprendizado.

2.3. Metodologia e análise dos periódicos

Avaliamos alguns dos principais periódicos nacionais na área de Ensino de Ciência e Ensino de Física. A escolha dos periódicos que avaliaríamos foi feita da seguinte maneira: selecionamos os periódicos níveis A nas áreas de avaliação de Educação ou Ensino na última classificação quadrienal (2013 a 2016) disponível na plataforma online Sucupira, Qualis-Periódicos¹². Desse

¹² A plataforma online pode ser acessada diretamente pelo endereço eletrônico <https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/>. O item Qualis-Periódicos “disponibiliza uma lista com a

processo, o total de periódicos encontrados foi: 121 para Educação-A1, 380 para Educação-A2, 145 para Ensino-A1 e 198 para Ensino-A2¹³. Ressalta-se que alguns periódicos podem aparecer em mais de uma categoria analisada.

A partir disso, delimitamos a busca apenas nos periódicos que contivessem em seu nome pelo menos uma das palavras “Física” ou “Ciência”. Além disso, foram selecionados apenas aqueles que apresentassem em seu escopo o ensino de ciências naturais. Por exemplo, os periódicos “Histórias, Ciências, Saúde” e “Revista Brasileira de Ciências Sociais”, embora tenham passado em todos os crivos – nível A na área de Ensino ou Educação, e possui a palavra-chave “Ciência” em seus títulos – não foram selecionados visto que seus escopos de publicações não abrangem pesquisas relacionados ao ensino de ciências físicas.

Por último: consideramos apenas os periódicos que possuísem em seus respectivos endereços eletrônicos a opção de busca em texto completo (além das categorias autor, título, resumo e termos indexados)¹⁴.

Finalmente, os periódicos analisados foram os seguintes: Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF); Investigações em Ensino de Ciências (IENCI); Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia (RBECT); Revista de Ensino de Ciências e Matemática (REnCiMa); Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências (RBPEC); Acta Scientiae: Revista de Ensino de Ciências e Matemática (RECM); Amazônia – Revista de Educação em Ciências e Matemáticas (ARECM) e Revista de Educação, Ciências e Matemática (RECMAT).

Em posse dos oito diferentes periódicos, buscamos pelas palavras-chave: *eletromagnetismo*, *magnetismo*, *eletricidade*, *elétrico*, *elétrica*; em todos os campos de busca. Delimitamos as publicações a partir do ano 2000. Ou seja, analisamos os trabalhos publicados entre os anos 2000 e 2019.

classificação dos veículos utilizados pelos programas de pós-graduação para a divulgação da sua produção”, informação retirada do próprio endereço eletrônico em dezembro de 2019.

¹³ Adotamos por realizar a pesquisa de periódicos nesse banco de dados pois ele é o maior banco de dados de periódicos nacionais na área de interesse. Por exemplo, todos os periódicos da área de Ensino/Educação em Ciências/Física que aparecem no banco de dados da SciELO (<https://scielo.org/pt/periodicos/listar-por-assunto>) também aparecem na lista do Qualis-Periódicos. Contudo, o inverso não é verdadeiro.

¹⁴ Consideramos a opção de busca em texto completo dentro do periódico como de suma importância para termos melhor noção do conteúdo das publicações. Alguns periódicos como “Ciência e Educação”, “Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências” e “Revista Brasileira de Ensino de Física” não foram considerados visto que em seus respectivos endereços eletrônicos não é possível pesquisar por termos no texto completo e isso afetaria a precisão do método.

A pesquisa se concentrou em publicações direcionadas ao ensino de Física dentro do ambiente da educação básica e universitária. Assim, artigos nos quais o direcionamento fosse a formação de professores, levantamento de concepções espontâneas dos alunos e suas motivações, análises amplas de currículo ou cálculos teóricos para construções de arranjos experimentais foram desconsiderados. Por exemplo, trabalhos como o Scarinci e Pacca (2010) sobre análise e investigação de professores de física em programas de formação contínua, e Silveira e Marques (2012) sobre apresentação de dois projetos de motores elétricos de indução foram excluídos. Como observado por Pereira e Ostermann (2009) e Batista e Peduzzi (2019), a exclusão de artigos em uma revisão não implica que estes não são valiosos para a pesquisa em ensino de física, mas apenas que não compõe o escopo da investigação realizada.

Desse modo, procurávamos artigos que pudessem auxiliar na elaboração do modelo teórico para o ensino de eletromagnetismo a partir de um referencial teórico na área da educação ou psicologia do desenvolvimento humano. Uma dificuldade que tínhamos – e temos – foi refletir sobre como construir “pontes” entre (i) um referencial teórico do campo da psicologia da educação e (ii) o ensino de eletromagnetismo. Assim, mesmo não encontrando a teoria de Davydov no conjunto (i) nós expandimos a revisão da literatura para entender como quem optou, por outros referencias da teoria histórico-cultural fizeram para “concretizar” os pressupostos pedagógicos, psicológicos ou didáticos ao ensino do eletromagnetismo.

Outrossim, pontuamos que o intuito desta revisão bibliográfica não é exaurir as possibilidades da abordagem do ensino de eletromagnetismo. Essa revisão oferece um direcionamento ao tentarmos compreender os principais referenciais teóricos que sustentam as estratégias adotadas por professores e pesquisadores no que se refere a propostas pedagógicas sobre o ensino de eletromagnetismo, visto que forma, com a teoria de Davydov, o problema de pesquisa dessa dissertação.

2.3.1. Resultados da revisão

Na Tabela 1 caracterizamos os artigos avaliados conforme a escolaridade alvo dos trabalhos ou o nível de ensino no qual a intervenção didática foi realizada. Alguns artigos foram classificados em mais de um nível

de ensino simultaneamente, isso ocorreu quando os autores apontaram que o trabalho por eles apresentados podem ser realizados em mais de um nível de escolaridade.

Tabela 1. Artigos segundo o nível de ensino no qual os autores dos artigos acreditam que estes melhor se destinam.

	Nível de Ensino	Número de artigos
Escolaridade	Fundamental I	4
	Fundamental II	5
	Educação de Jovens e Adultos	1
	Ensino Médio	24
	Ensino Médio com Técnico	8
	Ensino Superior	5

Fonte: autoria própria.

Como esperado, a maior concentração de trabalhos com o assunto de eletromagnetismo possui o foco no ensino médio. Esse resultado é razoável ao levarmos em consideração que o conteúdo referente ao eletromagnetismo é majoritariamente presente nos livros didáticos do ensino médio, se comparado ao ensino fundamental. É interessante notar que em nossa amostra, o número de artigos destinados ao ensino fundamental supera o do ensino superior.

Notamos que, em geral, os trabalhos direcionados ao ensino fundamental possuem o foco da atividade em uma interação investigativa através de experimentos realizados em sala de aula, tais como descritos por Lopes, Stein-Barana e Moreno (2009); Teixeira, Muramatsu e Alves (2017); Azevedo e Fireman (2017); Matos e Valadares (2001); Silva Junior et al. (2019).

O único trabalho destinado à EJA (GONZALES; ROSA, 2014) optou pelo uso de ambientes virtuais de ensino, no qual os autores fizeram uso de simulações para trabalhar com circuitos elétricos e utilizaram da teoria da aprendizagem significativa para elaboração da sequência didática. Na tabela 2 organizamos em linhas gerais os 32 referenciais teóricos encontrados em 46 artigos com a revisão da literatura.

Tabela 2: Relação dos referenciais teóricos utilizados para o ensino de eletromagnetismo.

Referencial teórico	Artigo
História e filosofia da ciência	Guerra, Reis e Braga (2004); Oliveira, Reis e Silva (2018)
Construtivismo na atividade de	Pinto, Silva e Ferreira (2017)

laboratório aliada à história da ciência	
<i>Just-in-Time Teaching</i> aliado ao <i>Peer Instruction</i>	Müller et al. (2012); Oliveira, Veit e Araujo (2015); Quintas e Carvalho (2016)
<i>Team-Based Learning</i>	Espinosa, Araujo e Veit (2019)
Três momentos pedagógicos	Macêdo, Dickman e Andrade (2012); Pires, Ferrari e Queiroz (2013)
Linguagens geradoras de viabilidade comunicacional	Camargo e Nardi (2008)
Teoria dos campos conceituais	Sousa e Fávero (2002); Sousa, Moreira e Matheus (2011); Leitão, Fernandes e Lage (2018); Rocha e Catarino (2019)
Teoria da mediação cognitiva	Pieper e Andrade Neto (2015)
Estatutos do conhecimento biológico	Moraes, Oliveira e Goldschmidt (2017)
Epistemologia genética de Jean Piaget	Freiesleben, Loder e Becker (2017)
Teoria histórico-cultural	Erthal e Gaspar (2006); Monteiro et al. (2010); Paula e Talim (2012); Setlik e Higa (2019)
Aprendizagem significativa	Laburú, Gouveia, e Barros (2009); Spohr, Garcia, e Santarosa (2017); Gonzales e Rosa (2014); Pedroso e Araújo (2012); Azevedo (2013); Siqueira e Torres (2010)
Ensino por investigação	Matos e Valadares (2001); Sousa, Malheiros, e Figueiredo (2015); Azevedo e Fireman (2017); Silva Junior et al. (2019)
Ensino por descoberta	Resende e Fireman (2014)

Fonte: autoria própria.

A teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel foi o mais presente dentre os referenciais teóricos escolhidos pelos autores, sendo o alicerce de pelo menos 7 diferentes propostas didáticas. A predominância da teoria da aprendizagem significativa em artigos referentes ao ensino de física e TIC também é relatada por Martins e Garcia (2011). Por outro lado, em nossa revisão, não encontramos propostas didáticas para o ensino de eletromagnetismo explicitamente pautados em ideais freireanos, por exemplo.

2.3.1.1. Resultados específicos referentes a teoria histórico-cultural e o ensino de eletromagnetismo

Dos 30 artigos que compõe a tabela 2, quatro se apropriam do referencial teórico da teoria-histórico cultural, relacionando-o com o ensino de eletromagnetismo. A tabela 3 relaciona esses quatro artigos com seus respectivos objetivos.

Tabela 3. Autoria e objetivos dos artigos analisados considerando que todos os artigos se direcionam a alunos do ensino médio.

Autorias	Objetivos dos artigos
Erthal e Gaspar (2006)	“[apresentar] o conceito de corrente alternada centrado em atividades experimentais de demonstração”. (p.347)
Monteiro et al. (2010)	“[apresentar] uma proposta de atividade experimental de demonstração de fácil montagem e de baixo custo, cuja abordagem didático-pedagógica segue as indicações da teoria sócio-histórica de Vigotski”. (p. 374)
Paula e Talim (2012)	“investigar a percepção dos estudantes acerca do uso coordenado de um Laboratório Virtual com outros recursos mediacionais”. (p. 636) Além disso, os autores também discutem duas questões teóricas “(i) quais são os fundamentos teórico-metodológicos que sustentam as escolhas pedagógicas realizadas durante a concepção e a articulação dos recursos mediacionais utilizados em nosso curso? (ii) que expectativas sobre as contribuições do LV estão contidas nesses fundamentos?”. (p. 619).
Setlik e Higa (2019)	“O objetivo desta investigação é analisar as perspectivas de diferentes sujeitos - professor de Física e estudantes do Ensino Médio - de um contexto escolar sobre as contribuições e dificuldades de práticas de leitura e escrita em aulas de Física, tecendo reflexões à luz dos conceitos de cultura escolar e da escola”. (p.455).

A tabela 4 resume a utilização do referencial teórico da teoria histórico-cultural para embasar o trabalho dos autores supracitados.

Tabela 4. Síntese das características dos artigos analisados.

Artigos	Apropriação do referencial teórico
Erthal e Gaspar (2006)	Direcionam o olhar da relação de ensino e aprendizagem para as interações sociais conduzidas pelo parceiro mais capaz e mediador materializadas no professor. Observam a apropriação do conhecimento físico por parte dos alunos a partir das relações que estes eram capazes de realizar com os outros sujeitos e com o mundo cotidiano.
Monteiro et al. (2010)	Usam do suporte teórico da teoria histórico-cultural como abordagem que direcione a exploração das potencialidades do recurso experimental apresentado, funcionando como orientador do processo interativo entre aluno e professor. Foco na proposição de James Wertsch ao longo das atividades de demonstração: a possibilidade de ocorrer a mediação semiótica aumenta à medida que a atividade oferecer maior potencial de exploração.
Paula e Talim (2012)	Utilizam dos fundamentos da teoria da ação mediada descrito por James Wertsch para interpretação <i>a posteriori</i> das interações estudante-estudante ou estudantes-professor.

Setlik e Higa (2019)	Baseado em Vigotski, consideram o papel da aprendizagem como estímulo ao desenvolvimento e a contextualização dos conceitos científicos para além dos significados das palavras. De Bakthin, ampliam o significado das palavras, analisando a linguagem em seus acontecimentos e relações sociais.
----------------------	--

Destaca-se nos objetivos dos trabalhos que o aporte fornecido pela teoria histórico-cultural, mais especificamente o conceito de ação mediada entre o aluno e o sujeito mais capaz, este último personificado na imagem do professor, possibilita a investigação de diferentes conceitos a partir de diferentes práticas metodológicas: uso de experimentação (ERTHAL; GASPAR, 2006; MONTEIRO et al., 2010) ou uma combinação de recursos como realização de experimentos e laboratório virtual simulador de circuitos (PAULA; TALIM, 2012). Há também a possibilidade da caracterização das práticas de leitura e escrita de textos nas aulas de Física para compreender o processo de ensino e aprendizagem (SETLIK; HIGA, 2019).

Como resultado, percebemos que os autores direcionam atenção às relações mediacionais dentro da sala de aula, sendo estas dos mais diversos tipos como professor-aluno, aluno-aluno, aluno-experimento, aluno-simulações, entre outras. Conforme nos alerta Vigotski (2002), essa interação social ou mediação pedagógica promovida pelo professor, deve ocorrer dentro da zona de desenvolvimento proximal do educando, a fim de viabilizar condições para que os aprendizes se apropriem do conhecimento científico promovendo o desenvolvimento.

Em nossa análise, constatamos que a mediação e a interação entre os recursos mediacionais foram os conceitos vigotskianos mais utilizados. Esse resultado está em consonância com os resultados de Bonfim, Solino e Gehlen (2019, p. 242) quando apresentam que “os conceitos vygotskianos mais utilizados pelos pesquisadores da área [ensino de ciências] são a Interação (37%), Mediação (23%) e Zona de Desenvolvimento Proximal (8%), tendo como base o total de 343 resumos dos trabalhos analisados”.

Embora na perspectiva da teoria histórico-cultural discuta-se o caráter motivador que atividades demonstrativas e investigativas podem propiciar, e a importância de ações de interação e mediação, fazendo deste referencial uma interessante escolha para orientação no ensino de ciências, ela parece não oferecer subsídios teóricos para a escolha dos temas a serem investigados.

Portanto, em nossa análise, discussões sobre quais relações poderiam ser o foco das interações e das ações de mediação, central na teoria do ensino desenvolvimental davydoviana, não apareceram em trabalhos de ensino de eletromagnetismo que utilizam da teoria histórico-cultural vigotskiana.

3. Referencial teórico

Neste capítulo apresentamos pontos relevantes que constituem o referencial teórico deste trabalho. Ao tomarmos nosso objeto de pesquisa como complexo, necessitamos lançar mão de uma diversidade de marcos referenciais que nos ajudarão a resolver, ou ao menos esboçar soluções para as possíveis conexões entre o ensino de eletromagnetismo e a construção do pensamento teórico. Noutras palavras, a delimitação do que pode vir a constituir uma eletromagneticidade.

Para tanto, optamos em nossas discussões por uma perspectiva teórica que busque parâmetros que possibilitam apreender os fenômenos no processo formativo, a partir da dimensão humana de formação dos indivíduos que, como seres socialmente determinados, estruturam suas atividades nas relações subjetivas e objetivas presentes nas ações humanas (RODRIGUES, 2009). É nesse contexto que temos a teoria do ensino desenvolvimental desenvolvida por Davydov e colaboradores.

A Física possui uma linguagem técnica que se utiliza de palavras familiares, tais como: força, trabalho, calor, energia, interação, campo, em sentidos específicos, que em diversos momentos na história foram modificados. Por exemplo, a ambiguidade em conceitos relacionados ao eletromagnetismo devido à linguagem foi apontada por Faraday durante seus estudos com o fenômeno da indução e considerações acerca da carga elétrica¹⁵. Conceitos como ‘interação’ e ‘polaridade’ também se mostraram ambíguos e acompanhados por diferentes interpretações entre os físicos contemporâneos do século XIX (DARRIGOL, 2000, p. 108). Além disso, uma intercambiação de termos também é visível nos trabalhos de um mesmo autor, como no caso de Maxwell. Para designar o que hoje chamamos de “campo magnético”, tem-se tanto ‘*magnetic intensity*’ no seu artigo de 1864 como

¹⁵ Nas palavras do físico inglês, “*I feel that many of the words in the language of electrical science possess much meaning; and yet their interpretation by different philosophers often varies more or less, so that they do not carry exactly the same idea to the minds of different men*” (DARRIGOL, 2000, p. 94).

‘*magnetic force*’ no *Treatise* de 1891 (BEZERRA, 2006, p. 190). Também, há casos nos quais os termos utilizados pelos autores do século XIX, embora ainda existam hoje, apresentam diferentes entendimentos. Por exemplo, o caso de ‘*force*’ presente em Helmholtz. O físico alemão faz referência a respeito da soma de ‘*the total living force*’ e ‘*the sum of tensional force*’ como sendo uma quantidade conservada na natureza. Modernamente, entendemos este ‘*force*’ como energia; sendo ‘*living force*’ a energia cinética e ‘*tensional force*’ a energia potencial (DARRIGOL, 2000, p. 216). Ou seja, ambos os termos – força e energia – eram usados na época e continuam sendo usados hoje, contudo com diferente entendimento.

Analogamente, também encontraremos uma série de palavras como: concreto, essência, teórico, que precisarão ser definidas no intuito de comunicarmos com a menor ambiguidade de ideias. Dito isto, empenharemos esforços em algumas seções deste capítulo a fim de esclarecer termos chaves.

3.1. O contexto da escola psicológica histórico-cultural

Nosso aporte teórico inicia-se com as contribuições do entendimento da psicologia humana a partir de princípios dialético-materialistas e cujo fundador é L.S. Vigotski (LIBÂNEO; FREITAS, 2006). Em 1924, Vigotski, Luria e Leontiev formaram a *troika* (tríade) na qual se almejava a “criação de uma nova abordagem sobre os processos psíquicos” (LURIA apud AKHUTINA, 2017, p. 128) com o entendimento que estes processos estão intrinsecamente suscetíveis a variáveis históricas, sociais e culturais e menos dependentes de fatores biológicos, além de serem submetidos à investigação científica.

Prestes, Tunes e Nascimento (2017, p. 68) resumem em poucas palavras que o desafio de Vigotski e colaboradores era de “criar uma nova abordagem dos processos psicológicos estritamente humanos e pôr a psicologia em bases materialistas”.

Posteriormente, ao longo das décadas, muitos outros proeminentes psicólogos e pedagogos da antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) se uniram ao grupo de trabalho formado nos anos de 1920. Com o tempo, a teoria da atividade, base teórica liderada por Leontiev, foi expandida e

ampliada com diferentes focos¹⁶. Libâneo e Freitas (2006) apresentam como exemplo os casos dos pesquisadores soviéticos Galperin (Psicologia Infantil), Boyovich (Psicologia da Personalidade), Elkonin (Psicologia do desenvolvimento), Zaporoyetz (Psicologia da evolução), Levina (Psicologia da Educação).

Rigon, Asbahr e Moretti (2016) sintetizam o desafio da psicologia histórico-cultural:

Para a psicologia histórico-cultural cabe o desafio de compreender como as formas sociais de atividade produzem formas específicas de psiquismo humano, ou como se desenvolveram socialmente as formas individuais do psiquismo. Dessa maneira, o projeto central da teoria histórico-cultural é estudar a formação da subjetividade dos indivíduos a partir de seu mundo objetivo, concreto, isto é, a formação da consciência humana em sua relação com a atividade (RIGON; ASBAHR; MORETTI, 2016, p. 25).

O grande número de ramificações que emergiu da psicologia social após Vigotski dificulta a sua exata nomenclatura. Rodrigues (2009) nos mostra que a denominação dessa área de pesquisa varia em psicologia histórico-cultural, psicologia sociocultural, psicologia sócio-histórica, ou psicologia sócio-cultural-histórico. O autor explica que a diferença vai para muito além da nomenclatura e que nutre um debate amplo sobre os processos da prática humana.

Para nossa discussão, é importante considerarmos que: a criança está imersa de modo ativo e criativo nas práticas sociais, culturais e históricas que sustentam as atividades humanas e que o desenvolvimento humano é fruto e percurso de um complexo processo dialético. O seio da teoria histórico-cultural rompeu com o entendimento da época relacionado ao desenvolvimento intelectual do sujeito. Vigotski, ao propor que “a determinação da consciência individual segue o esquema: atividade social coletiva – cultura – signos – atividade individual – consciência individual” (DAVYDOV, 1982, p. 164 apud ROSA; DAMAZIO, 2017, p. 154, tradução dos autores) marcaria uma nova linha de investigação à pesquisa psicológica e pedagógica.

Desse modo, sintetizamos um pressuposto basilar que oferece sustentação à teoria do ensino desenvolvimental preconizada por Davydov: a compreensão de que há diferentes tipos de conceitos, cada qual possuindo diferentes características e particularidades. Vigotski (2007) diferencia os

¹⁶ A “troika” que existiu de 1924 a 1934 então se tornou em “vosmiorka”, agregando novos pesquisadores à equipe de Lúria e Leontiev (VIGODSKAIA, 2010; PRESTES; TUNES; NASCIMENTO, 2017, p. 67). Vigotski morreu jovem, aos 38 anos, em 1934.

conceitos que são produzidos nas condições do ensino escolar (científicos), e propiciam a formação dos processos de generalizações e abstrações teóricas; e os conceitos cotidianos ou empíricos que são formados com base nas ações concretas da criança em seu cotidiano. Além disso, Vigotski defende que o desenvolvimento de funções psíquicas superiores é fruto de um fenômeno ativo de interiorização e apropriação do mundo exterior, mediado pela linguagem e pela cultura através de um processo dialético. Isto é, o conhecimento ocorre primeiramente no mundo social, recheado e inundado de signos para então se transformar em conhecimento individual.

Libâneo e Freitas (2017, p. 336) destacam ainda que o aprendizado para acarretar desenvolvimento mental da criança precisa ser organizado e sistematizado corretamente, sendo que a base “do desenvolvimento intelectual das crianças é o conteúdo dos conhecimentos assimilados”. Adotamos da posição apresentada por Dias e Souza (2017) para o papel de conteúdo:

Ao mesmo tempo que os conteúdos cientificamente estruturados carregam em si mesmos o potencial cultural humano e se conformam como marco evolutivo das sociedades em toda a sua historicidade, exercem, na estrutura da atividade, o papel de mediadores das relações do homem com os sistemas simbólicos neles materializados. Assim, quando se apropria de tais conteúdos, o indivíduo apropria-se também de um modo de organização do pensamento universal presente nas estruturas de níveis superiores de pensamento. Tais apropriações não são adquiridas empiricamente, por meio das ações cotidianas ligadas aos níveis de pensamento empírico, pois estão vinculadas ao pensamento teórico e dependem de processos de ensino institucionalmente organizados em que se reproduzam os significados historicamente produzidos. (DIAS; SOUZA, 2017, p. 185-186).

Neste contexto, Libâneo e Freitas (2017) explicitam a proposta didática de Davydov partindo de três premissas básicas da teoria vigotskiana:

A primeira consiste em que as funções psíquicas superiores estão enraizadas nas formas histórico-sociais da existência humana, ou seja, nos instrumentos culturais já desenvolvidos pela humanidade, acumulados social e historicamente. A segunda é de que a constituição do indivíduo como ser humano requer que ele se aproprie desses instrumentos culturais, internalizando-os, ou seja, fazendo com que se tornem meios de sua própria atividade. A terceira é de que essa apropriação implica uma complexa atividade da consciência humana que é a generalização e a formação de conceitos, de modo a ultrapassar os limites da experiência sensorial imediata (LIBÂNEO; FREITAS, 2017, p. 361).

O modelo promovido por Vigotski faz referência à instrução e ao aprendizado como fontes do desenvolvimento psíquico, onde a instrução deveria preparar e motivar a criança para uma participação ativa e criadora nas

práticas sociais existentes, bem como o desenvolvimento de funções psíquicas como: raciocínio lógico, atenção, memória, generalização, e abstração, que ainda não estivessem totalmente amadurecidas.

Diante do exposto, Davydov desenvolve uma concepção própria de organização do ensino escolar com o foco na apropriação dos conceitos TCU e na habilidade intelectual de trabalhar com o objeto de maneira crítica e autônoma, almejando a capacidade de generalização teórica. Em outras palavras, Davýdov (1982) entende que o conhecimento teórico deve ser a essência da atividade de ensino, pois é através da sua apropriação que se formará o pensamento teórico na criança, acarretando seu desenvolvimento psíquico.

3.2. O ensino desenvolvimental

A teoria do ensino desenvolvimental lapidada por Davydov e seu colaborador principal Daniil Elkonin nasce com as obras de Vigotski e na teoria da atividade de Leontiev. Como apontou, Duarte (2016, p. 37) “a psicologia histórico-cultural não é e não pode ser uma pedagogia, o que ela pode ser é um dos fundamentos de uma pedagogia”¹⁷.

Davydov reconhecia ao menos dois tipos de conhecimentos sociais: empírico e teórico, que são conectados e possuem especificidades distintas para o desenvolvimento da ciência (HEDEGAARD, 1996). Uma grande preocupação de Davydov e Elkonin era fazer com que as crianças obtivessem controle sobre o conteúdo que aprendiam na sala de aula, em outras palavras, que as crianças fossem capaz de lidar com o conteúdo de maneira autônoma. A importância do trabalho com o conteúdo para o planejamento do ensino é um ponto fundamental na teoria do ensino desenvolvimental (CHAIKLIN, 1999).

Trabalhar autonomamente com o conteúdo significa ser cada vez mais capaz de realizar o movimento de vaivém de abstração aos casos concretos e vice-versa. E lembramos que no contexto do século XX após revolução russa, o modelo que vigorava nas escolas soviéticas trabalhava majoritariamente o conhecimento e a formação do pensamento empírico (ASSUMPÇÃO, 2016).

¹⁷ Com isso, pode surgir uma questão de debate: em que medida a teoria do ensino desenvolvimental de Davydov é – ou pode ser – uma pedagogia? Não é o objetivo dessa dissertação esmiuçar essa questão em sua generalidade. Neste trabalho apenas mostramos que a teoria do ensino desenvolvimental pode cumprir com a mediação entre a psicologia histórico-cultural e a prática educativa (em particular, do ensino de eletromagnetismo).

Sabemos que facilmente aprendemos a reproduzir ideias e definições; contudo, o foco e a cobrança por parte dos agentes escolares devem ser que os estudantes possuam controle sobre o significado da informação que eles são capazes de reproduzir. Chaiklin (2002) argumenta que a análise e o trabalho do “conteúdo”¹⁸ são pré-condição na concepção do ensino desenvolvimental. Nesse contexto, e fundamentado na concepção materialista dialética do desenvolvimento humano, Davydov se empenhou

em formular um sistema de ensino público para a educação soviética, tendo o conhecimento teórico como base para a formação da consciência dos estudantes na relação com a realidade [...] destaca como objetivo fundamental de sua investigação as peculiaridades psicológicas da formação do pensamento nos alunos, sobretudo a abstração, a generalização e o conceito, enquanto bases para a estruturação das disciplinas escolares (LIBÂNEO; FREITAS, 2017, p. 333-334).

Essa visão para a função da educação deve ser esperada como função da escola, tendo em vista que a escola é o componente fundamental do sistema educacional da tradição marxista e da teoria histórico-cultural (PUENTES; LONGAREZI, 2013). Os autores ainda destacam o papel visceral da construção do pensamento teórico como foco do ensino escolar:

A instituição socialmente responsável por intervir de maneira positiva em todos os aspectos da vida psíquica do estudante, desenvolvendo em especial suas capacidades mentais e sua personalidade é a escola. Não obstante, ainda quando a escola deve participar – e participa – no processo de formação multifacetada dos estudantes, a formação do **pensamento teórico** ocupa um lugar central no desenvolvimento (PUENTES; LONGAREZI, 2013, p. 252).

Entendemos, assim, que a função da escola passa a ser não mais um ensino com o foco no aprendizado de características empíricas dos objetos, mas toma-se o foco na criação de uma instrução pedagógica pertinente e capaz de trabalhar o desenvolvimento e apropriação de outro tipo de pensamento: o pensamento teórico. Esse pensamento admite a tarefa de:

justamente superar a ‘pseudoconcreticidade’, elaborar os dados da contemplação e da representação na forma de conceitos, e revelar o movimento, a essência do fenômeno, por meio do procedimento de ascensão do abstrato ao concreto (RIGON; ASBAHR; MORETTI, 2016, p. 42).

A teoria do ensino desenvolvimental desenhada por Davydov volta-se para o desenvolvimento e construção do pensamento teórico dos estudantes

¹⁸ Chaiklin (2002) utiliza os termos em inglês *subject-matter content*, *subject-matter teaching and learning*, *subject-matter instructional practice*, e *subject-matter analysis* ao longo de toda sua obra. Utilizamos o termo “conteúdo” para tradução do termo “*subject-matter*” nessas situações.

através do método materialista histórico e dialético. Ou seja, na apropriação de conceitos há “a reconstrução interna de uma operação externa” (VIGOTSKI, 2002, p.74). Adicionamos o entendimento de *apropriação* presente em Davydov e Márkova (1987):

A assimilação (apropriação) não é a adaptação passiva do indivíduo às condições existentes da vida social, não é uma simples réplica da experiência social, senão a representação do resultado da atividade do indivíduo destinado a dominar os procedimentos, socialmente elaborados, de orientação no mundo objetal e suas transformações, procedimentos que paulatinamente se convertem em meios da própria atividade do indivíduo [...] Na educação escolar a atividade da criança para assimilar a experiência socialmente elaborada se realiza na atividade de estudo (DAVYDOV; MÁRKOVA, p.322-323, tradução nossa).

Desse modo, ao percebemos o objetivo de organizar e sistematizar o ensino de tal modo que favoreça a aprendizagem de conceitos TCU com potencial para o desenvolvimental do pensamento teórico das crianças, temos a que o ensino desenvolvimental se estrutura no seu próprio conteúdo, na elaboração de conceitos TCU.

Libâneo e Freitas (2017) descrevem em caráter de síntese que a teoria de Davydov:

oferece uma base teórico-metodológica que reúne princípios psicológicos em função de objetivos pedagógicos e didáticos de formação do pensamento teórico-científico dos alunos. Ele defendeu que o ensino mais compatível com o mundo contemporâneo, da ciência, da tecnologia, dos meios de comunicação, da cultura, aquele comprometido com a transformação pessoal e social do aluno, que o ajude a desenvolver a análise dos objetos de estudo por uma forma de pensamento abstrata, generalizada, dialética [...] os conceitos básicos de sua teoria: a atividade humana e a de ensino-aprendizagem, a generalização e a formação do conceito, o ensino desenvolvimental e a atividade de estudo (LIBÂNEO; FREITAS, 2017, p. 332).

Ainda neste sentido, se referindo aos pressupostos teóricos da teoria davydoviana, Rosa, Moraes e Cedro (2016) comentam que

O pressuposto teórico é que os estudantes, ao compreenderem os princípios gerais de um conhecimento, saberão lidar com as variações particulares, com poucas intervenções do outro (mestre, formadores, pares mais experientes). Esse pressuposto constitui um princípio teórico-metodológico da concepção materialista histórico-dialética do conhecimento (ROSA; MORAES; CEDRO, 2016, p. 174-175).

Davydov escreveu sobre a formação de generalizações e as características dos conceitos TCU e empíricos, a sua lógica estrutural e a concretização destes em casos concretos. Vejamos cada um destes individualmente.

3.3. Considerações sobre essência e conhecimento teórico

No ensino desenvolvimental de Davydov busca-se desenvolver o pensamento de maneira a refletir as relações essenciais presentes nos fenômenos. O “essencial” segundo a interpretação de Davydov está relacionado com a “universalidade”, ponto comentado na seção 1.3. Procurar pelas relações essenciais significa procurar pelas relações universais presentes nos fenômenos. A ascensão para o concreto é entendida como pensamento teórico, que por sua vez é alicerçada na presença e manipulação dos conceitos TCU.

Porém, antes de nos determos nessas noções, examinemos com mais vagar o que Davydov entende como atributos “essenciais”:

Atributos “não essenciais” são atributos que mudam amplamente. É lógico supor que os “essenciais” são atributos *constantes, estáveis que são retidos* em um determinado grupo de objetos à medida que os não essenciais mudam - ou seja, são invariantes e, nesse sentido, “abstratos” ou quintessências [...] O *geral* como algo recorrente ou estável é uma invariante definitiva das diversas propriedades de objetos de um determinado tipo - isto é, é *essencial*. Em muitos trabalhos, os termos “geral” e “essencial” são usados no mesmo sentido: para destacar atributos essenciais, é preciso percebê-los como atributos comuns a uma série de objetos, e não próprios de outros (DAVYDOV, 1990, p. 8, tradução nossa)

E agora, a sua definição de “essência”:

a essência é a conexão interna que, como fonte única, como base genética, determina todas as outras especificidades particulares do todo. Trata-se de conexões objetivas, as que em sua dissociação e manifestação asseguram a unidade dos aspectos do todo, isto é, dão ao objeto um caráter concreto. Neste sentido, *a essência é a determinação universal do objeto.* Por isso a abstração geneticamente inicial, substantiva, expressa a essência do objeto concreto (DAVYDOV, 1988a, p. 147, grifo nosso).

O significado de “conhecimento teórico” é explicitado em poucas palavras por Davydov (1998)

Vou repetir: conhecimento, que reflete a relação entre o interno e o externo, entre a essência e o fenômeno, o original e o derivado, é chamado de *conhecimento teórico*. Mas esse conhecimento só pode ser assimilado através da reprodução do real processo da sua *gênese*, produção e formação (DAVYDOV, 1998, p. 39, tradução nossa).

Por fim, Panossian, Moretti e Souza (2017) explicam a relação desses dois conceitos, *essência e conhecimento teórico*, em Davydov:

O conhecimento teórico do objeto resulta de tais “transformações”, que permitem o sujeito, ao reconstruir o objeto, superar sua aparência

e tomar consciência de suas propriedades e das relações que o constituem, em síntese da sua essência [...] Entende-se que o pensamento teórico opera através dos conceitos científicos que, por sua vez, permitem a reprodução de um objeto que é idealizado dentro de um sistema de relações. Por meio desta operação mental, que está condicionada às formas de atividade humana, reflete a generalidade e a essência do movimento do objeto material. (PANOSSIAN; MORETTI; SOUZA, 2017, p. 132/143).

A noção de conceitos TCU de Davydov (1990) é construída sobre a distinção hegeliana entre o ser e a essência. Sobre o legado de Hegel, Davydov (1990) comenta que a especificidade do pensamento abstrato é ação em potência para superação do mundo sensório-concreto, levando-nos ao “essencial, que somente é manifestado no conceito” (DAVYDOV, 1990, p. 46, tradução nossa).

O olhar davydoviano sugere que em vez de investigarmos o mundo diretamente, poderíamos pensar sobre um modelo de relações como explicações dos fenômenos, isto é, a crença que o conhecimento sobre as coisas resultasse das relações de suas ações. Por outro lado, para Aristóteles, “uma pedra cai porque há nela um propósito intrínseco em dirigir-se, como se verá, para o centro do universo que é o seu lugar natural” (PEDUZZI, 1996, p. 50). Esta concepção aristotélica de mundo direciona o estudo dos fenômenos para os objetos particulares, neste caso, a pedra. Contudo, esse direcionamento do olhar dificultaria ou até mesmo impediria nossa compreensão clássica de gravidade. Demoraria séculos, com a revolução copernicana, e com as obras de Newton para interpretarmos a gravidade não como fruto intrínseco de um objeto, mas como fruto de uma relação. Neste caso, um candidato a conceito TCU não seria o conceito *gravidade* como muitos alunos tendem a responder quando questionados “por que se eu soltar o giz ele cai ao chão?”, mas sim a *relação de desbalanceamento entre as forças mecânicas* que atuam no giz. Ou seja, o conceito TCU o é em relação ao fenômeno, a *gravidade* apenas responde parcialmente o fenômeno da do giz, mas não explicita e explica a relação que o produz. Essa observação era esperada visto que “um pressuposto central do método materialista dialético é que os fenômenos não podem ser compreendidos em sua imediatez, em sua aparência. A apreensão do real não nos é dada pelo contato direto com o fenômeno” (RIGON; ASBAHR; MORETTI, 2016, p. 42).

O domínio dos conceitos TCU permite que o estudante possa trabalhar com uma infinidade de casos concretos, ou seja, que o estudante aja

autonomamente em relação aos objetos. Duarte (2016) expressa o que seria esse agir autonomamente:

Para a psicologia histórico-cultural, um indivíduo será tão mais desenvolvido psicologicamente quanto mais ele seja capaz de conduzir de forma racional e livre seus processos psicológicos por meio da incorporação, à sua atividade mental, da experiência psíquica humana corporificada e sintetizada na cultura (DUARTE, 2016, p. 45).

Entendemos o trabalho de Davydov (1990) como uma discussão das características estruturantes dos conceitos TCU em termos gerais. Noutras palavras, essas características são motivadas por uma série de assunções sobre a natureza da realidade e do conhecimento.

Ademais, é tomado como pressuposto que a realidade – no sentido de objetos, eventos, processos que notamos e criamos – possui uma estrutura interna. Isto é, há relações – que não são visíveis – que são essenciais e necessárias para o entendimento do atual estado de um objeto e de mudanças que este objeto possa vir a sofrer. Essas relações substantivas são descritas como a “essência” de um objeto.

Por exemplo, na mecânica clássica, a força de atração gravitacional de dois corpos pontuais é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. Essa relação está sempre presente. Quando falamos sobre as relações, elas não são abstrações formais, mas dependem completamente do conteúdo do fenômeno que estamos analisando.

Salientamos que nosso problema de investigação não termina se elaborarmos uma lista das relações que foram acumuladas e desenvolvidas ao longo dos séculos de atividade humana sobre os mais diversos conteúdos. Esta lista de relações não seria diferente do que temos atualmente na educação escolar, uma lista de informações supostamente factuais na qual o estudante precisa memorizar.

Note que mesmo tendo delimitado o problema de pesquisa – a busca por essas relações essenciais no ensino de eletromagnetismo – o conhecimento teórico não norteia a nossa investigação. Afinal, esse processo é o próprio cerne de nosso problema: o pensamento teórico se faz no movimento entre os conceitos TCU e os casos concretos analisados.

Dessa maneira reconhecemos que: i) **a ideia de conceitos TCU é uma maneira para lidar com a questão de “conhecer o mundo”**; ii) **a estrutura geral de um conceito TCU é presente em qualquer caso concreto**; e iii) **não**

há razão para acreditarmos que os conceitos TCU são suficientes ou exaurem-se, mas talvez eles possam providenciar algumas vantagens para a tentativa de “conhecer um objeto”.

3.3.1 Relação entre o conhecimento e o pensamento teórico

A relação entre conhecimento e pensamento utilizada por Davydov deriva das posições de Vigotski e do filósofo marxista soviético Evald Ilyenkov. Ao contrário de uma interpretação que distingue pensamento e conhecimento, Hedegaard e Chaiklin (2005) nos mostram a análise desenvolvida por Vigotski a respeito da indissociabilidade entre pensamento e conhecimento:

Vygotsky enfatizou a inseparabilidade das formas de pensamento do conteúdo do pensamento. Essa visão se mostra em contraste com a de muitos pesquisadores que tendem a interpretar a forma e o conteúdo dos conceitos separadamente. Essa visão comum surge, segundo Vygotsky, de uma crença que conteúdo é culturalmente desenvolvido, e socialmente e historicamente determinado, enquanto formas de pensamento são processos biológicos determinados por maturação orgânica, que correm paralelamente no desenvolvimento orgânico do cérebro. Na visão de Vygotsky, as formas de pensamento também são conquistas culturais, desenvolvidas como parte do pensamento com particulares conteúdos. Portanto, a interdependência entre forma e conteúdo caracteriza tanto a evolução histórica da humanidade e o desenvolvimento do indivíduo particular (SCRIBNER, 1985; VYGOTSKY, 1930/1998a, p.42 apud HEDEGAARD; CHAIKLIN, 2005, p. 35, tradução nossa).

Além de Vigotski e Ilyenkov, Davydov se apoiou em ideias de Meshcheryakov para articular os fundamentos da sua teoria do ensino desenvolvimental (LIBÂNEO; FREITAS, 2017). Segundo Ilyenkov (2007, p. 76) “pensar” é a habilidade de trabalhar com o objeto de maneira inteligente, isto é, em concordância com a sua natureza e não a partir de devaneios fantasiosos do indivíduo. “Pensamento é realmente o funcionamento do conhecimento.”¹⁹

Desse modo, careceria de sentido sugerir que alguém sabe um determinado conceito, mas não sabe aplicá-lo ou trabalhá-lo em situações concretas. Abandonamos a visão psicológica na qual primeiro o indivíduo aprende um conteúdo e só depois ele aprende a usá-lo. Parte desta crença é baseada na ideia que temos algo como uma “enciclopédia mental” a qual consultamos toda vez que precisamos de respostas. Sobre esta crença Ilyenkov comenta que

‘pensamento’ aqui é entendido como algo ‘interno’ – um discurso mudo – algo como um monólogo silencioso, sussurrando para nós mesmos e que se necessário pode ser ‘exteriorizado’ para outros em

¹⁹ “*Thinking is really functioning knowledge*” (ILYENKOV, 2007, p. 76, grifo do autor).

forma de fala ou através da escrita (ILYENKOV, 2007, p. 76, tradução nossa).

Por exemplo, quando os alunos estudando mecânica precisam identificar as forças que agem em um corpo, essa ação mental é pensamento ou conhecimento?²⁰ Não vemos motivos para distinção.

A suposição ilyenkoviana que pensamento e conhecimento são faculdades psicológicas tão estreitamente ligadas que a análise não pode separá-las sem mutilá-las é de vital importância para o desenvolvimento do pensamento teórico. Além disso, o autor pontua que não existe um pensar abstrato, todo pensamento é em relação a um objeto, em suas palavras:

E quando as pessoas dizem (e elas dizem frequentemente) que **alguém possui o conhecimento mas é incapaz de “aplicá-lo” a realidade, elas estão fazendo uma absurda constatação**, metade dela completamente cancela a sua outra metade. Como alguém pode conhecer um objeto – e ser incapaz de relacionar esse conhecimento (conhecimento do objeto!) com o objeto?! **Essa situação paradoxal surge pois a pessoa não realmente sabe o objeto, mas sabe alguma coisa diferente. O quê? Frases sobre o objeto. Palavras, termos, fórmulas, signos, símbolos.** (ILYENKOV, 2007, p.76, tradução e grifo nosso).

Para Ilyenkov (2007) a essência da concepção do pensamento se mostra na sua manipulação de maneira autônoma, crítica e criativa por parte do indivíduo sobre o conteúdo. Em outras palavras, que o sujeito seja capaz de criar e gerar suas próprias ações em relação aos mais diversos objetos. Segundo o autor “pensar não é nada senão a habilidade de lidar inteligentemente com o objeto”²¹.

Assim, um sujeito pode ter uma capacidade muito sofisticada de pensamento em relação a um determinado conteúdo e ao mesmo tempo ter uma capacidade de pensamento primitiva com relação a outro conteúdo, pois a maneira que se pensa é indissociável da maneira que o conhecimento pessoal se estrutura. Por conseguinte, o estudante aprende a pensar enquanto aprende o conteúdo. Ressaltamos que *objeto* não se reduz a um material físico palpável, mas para exemplos como energia, ligações químicas, o sistema de transporte metroviário de São Paulo, etc. Desta forma, *objeto* não é algo particular, mas também inclui todas as ações que alguém poderia tomar em

²⁰ Nos referimos ao conhecimento apropriado pelo estudante, uma vez que também há conhecimentos “externos”, da humanidade por exemplo.

²¹ “*thinking*’ is nothing other than the ability to deal with each object intelligently” (ILYENKOV, 2007, p.76). Com essa citação e com a apresentada na nota de rodapé anterior, concluímos que na concepção ilyenkoviana – e adotada por Davydov – “pensamento” é “conhecimento”. Logo, tanto “pensar” quanto “conhecer” significa lidar autonomamente em relação aos objetos.

relação ao seu entendimento. Dentro do contexto do ensino de eletromagnetismo um aluno pode se perguntar não só porque ele observa uma lâmpada acesa, mas hipotetizar por que ela não estava acesa antes, o que mudou no sistema para fazê-la acender, de onde essa mudança vem, entre outras questões.

Mesmo tendo falecido nos anos 70, o trabalho de Ilyenkov nos permite conceber uma crítica atual para o sistema educacional que predominantemente temos. Estudantes de todos os níveis de ensino são muitas vezes treinados para responderem pontualmente certas palavras, e então se conclui que eles possuem conhecimento sobre aquele determinado conteúdo. Na verdade, esses estudantes assim treinados, não são capazes de agir autonomamente em relação ao conteúdo, pois não é a memorização que é fruto do pensamento, é a partir do pensamento que somos capazes de memorizar, ou “responder corretamente”. Nesse contexto Ilyenkov adiciona:

o indivíduo que não sabe como pensar de modo independente não domina a linguagem, é a linguagem que o domina, domina sua consciência. Seu pensamento (sua “fala interna”) se mantém em permanente estado de escravização de estereótipos verbais, em vazias construções semióticas memorizadas, em “regras”, estipulações, instruções (ILYENKOV, 2007, p. 78, tradução nossa).

Ilyenkov delimita o problema sobre o pensar de modo independente de tal maneira que podemos nos perguntar “o que é que a criança deve ter que a permite lidar autonomamente com um objeto?” Davydov (1990) se debruça sobre essa questão na qual explicita o papel das generalizações empíricas e teóricas. Para Davydov, a generalização empírica não proporciona habilidades para lidar autonomamente com o objeto. Nesse processo de generalização, o estudante seleciona diferentes características que são captadas por meio dos sentidos sensoriais, separando as qualidades repetidas ou atributos comuns de um mesmo objeto. Por exemplo, ao observar aves, a criança selecionaria as características como presença de penas, bicos, olhos, entre outros e isso classificaria uma generalização empírica por parte da criança. Faltam aos alunos os conceitos TCU das relações que permitem a existência do objeto para que eles sejam capazes de trabalhar o vaivém abstrato-concreto. Despendem-se esforços de professores e alunos criando um “saber” empírico factual com pouco valor para o desenvolvimento intelectual da criança.

Diante do exposto, temos as bases para discutir, a caráter de síntese na próxima seção, formas de interpretações dos conceitos empíricos e TCU e, por conseguinte, a dinâmica do processo de ascensão do abstrato para o concreto.

3.4 Síntese empírico x teórico: conceito, pensamento e generalizações

Tanto o pensamento empírico quanto o pensamento teórico são construídos socialmente; contudo, estes diferem na sua forma lógica de organização. Ao longo de todo esse capítulo tentamos explicitar o que entendemos por conceitos TCU, a tarefa é essencialmente complexa por falta de exemplos práticos, concretos (aqui utilizamos concreto no sentido cotidiano). Sobre essa questão, era mister para Davydov (1990) o esforço em nos alertar para a compreensão de um conceito TCU visto que ele “é um conceito com o mínimo suporte visual, com o máximo de construções verbais.”²²

Por outro lado, em certo sentido didático, podemos perceber o que **não** é um conceito TCU se assimilarmos o que são os conceitos empíricos. Estes últimos são conceitos isolados de um objeto particular, construção do nosso pensamento para as necessidades cotidianas. Concordamos com a apresentação de Davydov (1990) da concepção de Marx para os conceitos empíricos, na qual eles:

meramente descrevem, catalogam, relacionam e esquematizam definições de conceitos que são manifestados externamente [...] semelhança, dissociação em partes – essas são as propriedades gerais da realidade captada e ‘esquematizada’ pelos conceitos empíricos (DAVYDOV, 1990, p. 119, tradução nossa).

Assim temos que o conceito empírico é a formulação a partir da manifestação externa de um objeto, da sua aparência. Esta ação resulta na classificação, nomeação, descrições de informações quantificáveis.

Vemos que a própria formação de conceitos empíricos está intimamente relacionada com o processo de indução formando a generalização empírica, ponto já levantado por Rubinstein e que Davydov (1990, p. 143) se apropria para apresentar o esquema “percepção – concepção – conceito” ao se referir à formação dos conceitos empíricos, “passagem do individual, fatos particulares para fatos gerais”. Para Hedegaard e Chaiklin (2005) o conhecimento empírico

²² “A ‘theoretical concept’ [o que chamamos de conceito TCU] is a concept with a minimum of visual-pictorial supports, with a maximum of verbal constructions.” (DAVYDOV, 1990, p. 45).

utiliza-se de categorias para representação da realidade observada. Essas categorias podem então ser organizadas hierarquicamente através do “pensamento paradigmático”²³. Em outras palavras,

Os processos de generalização e abstração, baseados no empirismo, somente atuam como elementos organizadores da realidade, pois simplesmente diferenciam, classificam e denominam, com outros termos, os objetos e fenômenos. Logo, não fornecem elementos para que o sujeito possa criar novos conhecimentos, pois “a essência de um ou outro objeto ou nexos internos de suas propriedades, distingue-se dos fenômenos observáveis e diretamente perceptíveis” (DAVIDOV, 1982, p.95 apud ROSA; MORAES; CEDRO, 2016, p. 89).

Segundo Davydov (1990) não há questionamentos sobre a importância dos conceitos empíricos. Eles são suficientemente corretos e claros, e cumprem a função de descrição das características externas dos fenômenos. Contudo, entendemos que o ambiente escolar, ao ser local socialmente determinado para o estudo do conhecimento científico acumulado historicamente, deve trabalhar com os conceitos TCU; uma vez que demandam esforço e estudo sistemático no conteúdo e na forma dos objetos. Saviani (1998) apresenta algumas conclusões sobre as duas formas de conceitos discutidas:

Os estudos de Vygotsky e seus colaboradores levam-nos a concluir que os conceitos espontâneo e científico seguem, desde o início, direções contrárias: o primeiro vai do concreto para o abstrato, enquanto o caminho do segundo é do abstrato para o concreto; o primeiro é ascendente, o segundo descendente; o primeiro começa com o contato direto com o objeto, o segundo, com uma relação mediatizada com o objeto (a definição de certa abstração) (SAVIANI, 1998, p.73).

Ressaltamos um ponto destacado por Araujo (2017) a respeito da associação “direta” da relação que aquisição de conhecimento empírico tende a um pensamento também empírico. Concordamos com a autora ao dizer que essa relação não é tão trivial pois

ao discutir a relação entre pensamento e cognição, [Rubinstein] nos lembra de que “o conhecimento começa com a sensação, com a percepção – como conhecimento sensorial – e continua como pensamento abstrato que parte do sensorial e ainda que siga mais adiante, nunca se despreza dele” (RUBINSTEIN, 1965, p. 149 apud ARAUJO, 2017, p. 167).

²³ “*Paradigmatic thinking is the thinking mode of empirical knowledge* (Bruner et al., 1956; Bruner, 1974). *In paradigmatic thinking, the focus is on creating consistency in information by using categories.*” (HEDEGAARD; CHAIKLIN, 2005, p. 53).

A experiência prática até pode promover condições para o desenvolvimento do pensamento teórico; contudo, nesses casos, não presenciaremos a reflexão sobre a relação entre a essência e as aparências dos fenômenos.

Vejamos um exemplo²⁴: imaginemos um grupo de amigos que gostam de pilotar e aperfeiçoar suas motocicletas. É possível que eles desenvolvam um entendimento teórico de como ajustar o motor para melhorar o desempenho, isto é, dominem a substância do objeto. Talvez eles não possuam a terminologia ou uma linguagem adequada para descrever o processo, ou talvez eles criem as próprias palavras. Através da tentativa e erro eles estarão testando diferentes processos e maquinários e por meio da experiência eles começarão a formar generalizações e concluirão, por exemplo, que deve haver uma relação entre a quantidade de ar que entra nas válvulas do motor e a quantidade de combustível utilizado e a temperatura. Ou talvez ao longo dos testes, eles escutem algum som e comecem a se questionar e fazer relações sobre o que eles entendem até o momento sobre os elementos palpáveis da moto (válvulas do motor) e os abstratos (relação entre a quantidade de ar e a temperatura do motor) e essa situação pode descrever um pensamento teórico (compreender as relações teóricas que operam no objeto).

Uma das maneiras de desenvolver e trabalhar o pensamento autônomo é o domínio das generalizações. Segundo Davydov (1990, p. 5, tradução nossa) o termo generalização “é utilizado para designar muitos aspectos relacionados ao processo de aprendizagem das crianças nas escolas”, provém do trabalho com o conteúdo e é ligada ao processo de abstração. O autor exemplifica o processo de abstração da seguinte maneira:

Quando a generalização “o número 3 é 1 a mais do que o número 2” está sendo formada, não temos apenas que para *quaisquer* objetos 3 é 1 objeto a mais que 2, mas também a separação dessa característica das outras propriedades do objeto (material, tamanho, etc.), como resultado disso, a relação dada começa a ser em relação a números abstratos, como um particular objeto da atenção, abstraído de objetos concretos (DAVYDOV, 1990, p. 7, tradução nossa).

A crítica de Davydov (1990) logo em seu primeiro capítulo recai sobre a história da prática humana, na qual desenvolvemos um entendimento dos

²⁴Esse exemplo foi discutido entre Seth CHAIKLIN e o autor dessa dissertação, enquanto o autor estava sob sua orientação em estágio de pesquisa na *University College Copenhagen*.

fenômenos através de ações empíricas. Entretanto, somente com um entendimento reflexivo e uma autoconsciência sobre a lógica das relações observadas em casos concretos é que possibilitamos a apreensão da essência, porta para o desenvolvimento intelectual.

Em se tratando do sistema de ensino educacional, Hedegaard e Chaiklin (2005) apresentam que o ensino ao ser organizado em torno do pensamento empírico, geralmente não ensina os métodos de investigação e o conteúdo conjuntamente. Segundo os autores, “conteúdo” é separado em habilidades (ler, escrever, raciocínio lógico) e assuntos (física, química, música). As habilidades são ensinadas como “paradigmas” sem se preocupar com os conteúdos. Desse modo, os tópicos são apresentados como aulas a serem escutadas e lembradas desvinculadas das habilidades de investigação. Por esse motivo compreendemos que o processo de ensino de conceitos nas escolas deva, além de conciliar propostas didáticas que auxiliem com a manipulação das características dos objetos como uso de experimentos e TIC, também ser baseadas em referenciais pedagógicos que possam dar suporte teórico-metodológico ao professor²⁵.

Contudo, baseado em Davydov (1990), alertamos para as limitações dessa perspectiva e advogamos por um estudo analítico dos fenômenos. É pela generalização teórica que se põe a descoberto a essência dos fenômenos, as leis do seu desenvolvimento. Rosa, Moraes e Cedro (2016) contribuem para essa discussão ao apontarem que alunos que atuam em atividades de ensino baseadas no pensamento empírico em geral possuem grande dificuldade em diferenciar os atributos essenciais dos supérfluos de um objeto ou fenômeno.

Tabela 5: compara as principais características entre os dois tipos de conhecimentos discutidos.

Características	Conhecimento teórico	Conhecimento empírico
Fundamentação	Transformação e manipulação de objetos mediante análise da função das relações essenciais.	Descrição e catalogação de objetos observáveis em propriedades manifestadas externamente.
Como se expressam	Mínimo suporte visual, máxima estruturação verbal, múltiplas construções semânticas.	Nomes, informações quantificáveis, percepções sensoriais.

²⁵ Conforme discutimos na seção 2.2, apenas a utilização de recursos didáticos em sala de aula – como experimentos ou TIC – não diretamente ataca o problema de se tratar o conteúdo e os métodos de investigação separadamente. Para isso, acreditamos que seja necessário o auxílio de referenciais teóricos nos campos da educação que possam dar suporte e sentido à prática docente.

Processo de generalização	Fruto da operação de conceitos sobre a essência, permitindo a reprodução de um objeto em sua compreensão crítica e dialética.	Fruto da observação de semelhanças das partes, utilização do método de indução.
Objetivação	Buscam revelar as inter-relações e traços de objetos aparentemente isolados num todo.	Buscam semelhanças externas aparentes e comuns aos objetos em determinada classe.
Concretização	Concretizam-se nas relações.	Concretizam-se nos exemplos.
O que permitem	Analisar modelos de relações que evidenciem vínculos e contradições, possibilidade de pensamento independente do indivíduo.	Investigar o mundo diretamente, realização de tarefas materiais concretas.
Importância	Permitem que os indivíduos sejam sujeitos ativos sobre a própria atividade, desenvolvimento de pensamento abrangente, condição para significativo desenvolvimento psicológico.	Oferecem subsídios para realização de atividades concretas de convívio social como jogos, locomoção geográfica, lazer, trabalho. Reprodução de atividades.

Fonte: autoria própria.

3.5. Da ascensão do abstrato para o concreto, do processo de análise e da lógica do conteúdo

Para tratar a complexidade do movimento abstrato-concreto é necessário aprofundar os elementos dentro do processo dialético de análise. Ao considerar as relações que fazem parte das hierarquias que se estabelecem na dinâmica do conhecimento teórico, a análise se faz útil em sua potencialidade de revelar aspectos ligados às concepções que os sujeitos possuem de determinado conteúdo. Começamos nossa discussão a partir da questão apontada por Davydov (1990)

O estudo psicológico da formação e do funcionamento do pensamento no indivíduo permanece particularmente empírico se ele não se basear nos resultados de investigações lógicas da estrutura e “mecanismos” do pensamento genérico que são assimilados pelo indivíduo e convertidos nas formas de suas próprias atividades subjetivas. Aqui, na nossa opinião, muitas tentativas dos psicólogos de encontrar certos princípios e ‘mecanismos’ psicológicos particulares do próprio pensamento, em contraste com os lógicos, são desesperançados [...] o “desenvolvimento da lógica” na criança, que ocorre durante o *domínio* de categorias, é alcançado de acordo com princípios psicológicos de apropriação, de formação da consciência *individual*, ao invés de leis que são estudadas pela lógica [formal] (DAVYDOV, 1990, p.145-146, tradução nossa).

Davydov destaca o papel da “lógica das coisas”²⁶ na qual estamos interessados, visto que é a sua presença, de caráter dialético, uma

²⁶ Tradução de “*logic of things*” e “*logic of things themselves*” (DAVYDOV, 1990, p. 147).

especificidade *sine qua non* para a consolidação de generalizações teóricas.

Nas palavras do autor:

Lógica como uma disciplina particular, como teoria da cognição e como dialética, estuda as formas universais (categorias) do *pensamento* que nos permite refletir, é “lógica das coisas”, que destaca os essenciais e os não essenciais, o geral e o particular, as suas propriedades. (DAVYDOV, 1990, p. 147, tradução nossa).

Com a base materialista dialética, Davydov esclarece seu entendimento pela reciprocidade entre o concreto e o abstrato. O pensamento é responsável, com ajuda de generalizações e abstrações, de propiciar o movimento concreto-empírico ao abstrato-teórico e posteriormente abstrato-teórico se materializando em situações concretas síntese das múltiplas relações abstratas. E assim, o concreto é tanto o princípio quanto a chegada – agora transformada – desse processo.

[Portanto] o movimento de pensamento da forma sensorial concreta para abstração informal e a delineação do universal como essência e lei do desenvolvimento do sistema conduz para a formação do conceito. O conceito agora funciona como ponto de partida para recriação teórica do concreto (DAVYDOV, 1990, p.139, tradução nossa).

A concepção com relação ao binômio dialético concreto-abstrato de Davydov se alicerça na filosofia marxista. Segundo Marx (2008)

o concreto é concreto, porque é a síntese de muitas determinações, isto é, unidade do diverso. *Por isso, o concreto aparece no pensamento como o processo da síntese, como resultado, não como ponto de partida, embora seja o verdadeiro ponto de partida e, portanto, o ponto de partida também da intuição e da representação* (MARX, 2008, p.258-259, grifo nosso).

Kopnin (1978) contribui para a discussão destacando o papel do movimento abstrato-concreto:

O movimento do conhecimento do sensorial-concreto – através do abstrato – ao concreto, que reproduz o objeto no conjunto de abstrações, é uma manifestação da lei negação da negação. O abstrato é a negação do sensorial-concreto. **O concreto no pensamento é a negação do abstrato, mas o concreto mental não é a retomada do concreto inicial, sensorial, mas o resultado da ascensão a um concreto novo, mais substancial** (KOPNIN, 1978, p.162, grifo nosso).

Desse modo, nos vemos a fim de apreender a essência do fenômeno, revelada em seu movimento dinâmico. A análise só se fará pertinente caso mantivermos essa relação de movimento perpétuo, em investigação também perpétua, da relação entre unidade-totalidade.

Assim, quando nos referimos a “lógica do conteúdo”²⁷ estamos nos referindo sinonimamente – e aqui sentimos a falta de uma linguagem dinâmica adequada – ao movimento das relações e significados essenciais que estão presentes no objeto. Ora, se os significados estão presentes no objeto, eles organizam como o objeto será entendido? Não, pois somos *nós* que utilizamos das relações e significados para organizar *nosso* entendimento do objeto; afinal, “toda ciência seria supérflua se houvesse coincidência imediata entre a aparência e a essência das coisas” (MARX, 2008, p. 1080).

Imaginemos que soltamos uma pedra a 1 metro de altura em relação ao solo e ela cai ao solo, qual é a causa da queda? Uma resposta do tipo “a existência de um campo gravitacional no local onde a pedra se encontra” seria insuficiente, pois, ao chegar ao chão – e a pedra deixar de realizar o movimento de queda – o campo gravitacional em nada terá se modificado. Uma resposta segundo a interpretação do conhecimento teórico seria algo como “*a relação entre as forças* que agiam na pedra antes, e depois de a soltarmos, mudou”. Agora, a relação entre as forças que atuam no objeto é de equilíbrio.

Assim, afinamos o que queremos dizer por ter o conhecimento teórico de um fenômeno: referimo-nos aos processos pelos quais um objeto passa a *ser* ou deixa de *ser*²⁸, isto é, o conceito TCU é universal – no sentido que estão presentes em todos os casos concretos – e que são necessários para entender o comportamento ou a natureza de determinado objeto.

Segundo a tese defendida por Davydov (1990), generalizações teóricas implicam na condição dos conceitos TCU serem também universais. Sobre essas propriedades dos conceitos TCU, destacamos algumas passagens em sua obra:

Esse pensamento [teórico] é a idealização do aspecto básico da atividade prática envolvendo objetos, e a reprodução na atividade na forma universal das coisas, suas medidas e suas leis [...] uma ideia teórica ou conceito unem coisas que são não similares, diferentes,

²⁷ Utilizamos o termo *lógica do conteúdo* para nos referirmos aos termos em inglês “*logic of the subject*” (DAVYDOV, 1990, p. 163) ou “*logic of subject-matter*” (HEDEGAARD; CHAIKLIN, 2005, p. 67).

²⁸ A tradução em inglês utiliza da expressão “*being and nonbeing*” (DAVYDOV, 1990, p. 126) de Lenin com referência à Hegel. Também, ao longo da obra de Davydov (1990), é utilizado o termo “*appearance*”, que entendemos como tendo duplo significado, ambos apropriados: é tanto no sentido da maneira que o objeto aparece para nós, quanto no sentido da maneira que o objeto passa a ser. Ou seja, o termo simboliza tanto o objeto aparecer para os nossos sentidos quanto surgir em essência.

multifacetadas e não coincidentes, e devem indicar a proporção no todo. Consequentemente, a conexão objetiva do universal e o isolado (o integral, o distinto) emerge como um conteúdo específico do conceito teórico [...] A descrição do presente do ser como pré-requisito e consequência da mediação é um dos problemas do pensamento teórico, mas um problema que pode ser resolvido à luz do seu objetivo principal – clarificar a essência do objeto como uma lei universal do seu desenvolvimento (DAVYDOV, 1990, p. 116/119-120, tradução nossa).

O conceito TCU é universal se ele se faz presente – através da ascensão ao concreto permitida pelo pensamento teórico – em qualquer caso de análise do fenômeno. O pensamento teórico e a formação dos conceitos TCU podem ser resumidos da seguinte maneira:

A formação do conceito teórico [o que chamamos de conceito TCU] ocorre durante a passagem do geral para o particular (do abstrato para o concreto). É nessas passagens para manifestações particulares, o estabelecimento da conexão entre o inicial geral e suas manifestações, que o apropriado conceito (teórico) é dado forma e revelado [...] Somente no processo de desenvolvimento, do movimento em direção a concretude, é que realmente revela a sua geral natureza estruturante funcionando como base para um fenômeno particular, através de uma conexão com o fenômeno, realizando suas funções de combinação, suas concretudes. Aqui o universal é caracterizado de acordo com uma função específica no todo. Ele corresponde, por um lado, ao potencial de sua base originária desse todo (isto é, é relacionado com sua informal abstração inicial), e por outro lado, com um alto desenvolvimento do todo que é subordinado às suas próprias partes e que consequentemente engendra sua própria base (nesse nível o universal é conectado com o todo agregado de abstrações que reproduzem o concreto). A *realização* do universal desse tipo ocorre em coincidência dessas duas características (“início-fim”, “possibilidade-realidade”). (DAVYDOV, 1990, p. 143/133-134, tradução nossa).

O movimento de análise é laborioso, naturalmente abstrato e dependente do sujeito. Davydov usa da filosofia kantiana para comentar o papel crucial da imaginação nesse processo

De acordo com Kant, a formação original é um ato de *produção imaginativa*, como uma habilidade essencial da mente humana. Seu desenvolvimento, segundo Kant, permite ao homem criar esquemas, não apenas de coisas “criadas” por ele (como “círculos” ou “casas”), mas também de coisas naturais, visto que imaginação começa agir como um princípio universal de conexão entre *quaisquer* dados sensoriais (DAVYDOV, 1990, p. 118, tradução nossa).

Rigon, Asbahr e Moretti (2016) comentam o papel da investigação no processo de análise do fenômeno

[a análise] inicia-se pelo real, pelo imediatamente dado, mas, sendo este representado caoticamente, é uma abstração. A recriação do concreto necessita das abstrações de um tipo especial, de conexões simples que estão na base do concreto [...] *na análise de um fenômeno, o investigador deve separar os elementos que possuem*

caráter de universalidade, aquilo que é essencial na determinação do objeto (RIGON; ASBAHR; MORETTI, 2016, p. 42, grifo nosso).

Davydov escreve uma síntese sobre a relação entre os conceitos TCU, a universalidade, o processo de análise e o caráter da generalização:

Pensamento teórico é realizado em duas formas básicas: 1) com base na análise dos dados reais e a sua generalização uma abstração é delineada, estabelecendo a essência do objeto concreto que está sendo estudado, e que se expressa na forma do conceito de sua “célula”, 2) então, através da exposição das contradições nessa “célula” e a determinação do método para sua resolução prática, deve haver uma ascensão da essência abstrata e da indissociável relação universal até a unidade dos aspectos diversos do todo em desenvolvimento, ao concreto (DAVYDOV, 1990, p. 137, tradução nossa).

Por fim, após termos passado por cada uma das seções desse capítulo desmembrando os termos chaves da teoria davydoviana, podemos destacar alguns pontos importantes sobre os conceitos TCU: 1) **símbolos (linguísticos ou não verbais) que expressam o “universal” nos objetos são, eles próprios, formas da atividade humana**; 2) **nunca saberemos se um conceito é TCU, mas sim se ele *pode* ser, isto é consequência direta da infinidade de casos concretos possíveis e da impossibilidade de uma análise além da dedução do geral para o particular**; 3) **a formação de um conceito TCU ocorre durante a passagem do geral para o particular. São nessas passagens para o concreto que os conceitos TCU tomam forma**; e 4) **diferentes fenômenos apresentarão diferentes conceitos TCU, a relação entre esses conceitos e o pensamento teórico pode culminar em um modelo teórico**.

Hedegaard e Chaiklin (2005) esclarecem o que seria um “modelo teórico” nesse contexto

Um modelo teórico [*core model*] é um modo fundamental de pensamento dentro da tradição do conhecimento teórico. Modelos teóricos contêm células gérmenes [*germ-cells*] – as relações básicas, oposições e complementaridades que aparecem no interior de diversos fenômenos estudados dentro de uma determinada área (DAVYDOV, 1972/1990; DAVÝDOV et al., 1982, apud HEDEGAARD; CHAIKLIN, 2005, p. 55, tradução nossa).

Com isso, formalizamos a nossa “deixa” para investigação. Como mostra Hedegaard e Chaiklin (2005), a teoria davydoviana sugere que conceitos TCU de um determinado conteúdo formam um modelo teórico. No próximo capítulo investigamos aquilo que pode vir a ser este modelo de conceitos TCU para o ensino de eletromagnetismo.

4. Construindo um modelo teórico para o ensino de eletromagnetismo

Conforme vimos anteriormente, entendemos que os conceitos TCU são fruto de uma construção lógica, histórica e cultural. Desse modo, se queremos compreender a essência de um conceito nos moldes da teoria do ensino desenvolvimental, não podemos abrir mão de uma investigação *lógico-histórica*.

Do ponto de vista *lógico*, estudamos os conceitos que formam o eletromagnetismo atual. Para isso, recorremos à análise de diversos manuais didáticos reconhecidos na área, em particular: a teoria eletromagnética clássica compilada em três volumes (MACHADO, 2000, 2002, 2006); um enfoque conceitual do eletromagnetismo (HEWITT, 2002); e o livro que já serviu como base para estruturação do curso de eletricidade e magnetismo da Universidade da Califórnia, Berkeley (PURCELL, 1970); além de artigos e trabalhos de pós-graduação que se propuseram a elaborar um modelo conceitual para o eletromagnetismo (CUDMANI; FONTDEVILA, 1989; BAGNO; EYLON, 1997; MOREIRA, 2006; LABAS, 2016;) para eletrostática (SALÉM, 1986), sobre as equações de Maxwell e das ondas eletromagnéticas (GRIGORE; MIRON; BARNA, 2013).

Ao considerarmos o ensino do eletromagnetismo – fruto da revisão da literatura do capítulo 2 –, e o eletromagnetismo na sua forma atual e sua estruturação em atividades de construção de mapas conceituais, *percebemos que alguns conceitos científicos apareciam com mais frequência ou com mais relevância*. Estes são os conceitos que se referem a *carga elétrica, campo eletromagnético, força elétrica, potencial elétrico, corrente elétrica, indução eletromagnética e ondas eletromagnéticas*.

Como discutido, a teoria do ensino desenvolvimental necessita que delimitemos aquelas relações *centrais, essenciais, universais* uma vez que queremos formar um modelo teórico. Portanto, ***há relações que sustentam todos esses conceitos (tendo sempre em mente suas possibilidades de concretização nas práticas sociais)? Quais elas podem ser?***

Deste modo, a finalidade deste capítulo é fazer um “recorte” dos episódios da história do desenvolvimento do eletromagnetismo para mostrarmos que, ao regressarmos ao passado histórico da eletricidade e do magnetismo, podemos encontrar indícios do processo de formação das noções

desses conceitos estruturantes que serviram à elaboração de nosso modelo teórico.

Noutras palavras, desconfiamos que as relações centrais (os conceitos TCU) que formam o modelo teórico para o ensino de eletromagnetismo são aquelas que sustentam os conceitos científicos de campo eletromagnético, força elétrica, potencial elétrico, equações de Maxwell, radiação e ondas eletromagnéticas. Nas seções que se seguem iremos revisitar o desenvolvimento histórico do eletromagnetismo com um olhar direcionado para o surgimento destes conceitos.

4.1. Considerações históricas até Oersted

Alguns efeitos de fenômenos elétricos e magnéticos são conhecidos desde a Antiguidade, muito antes de seu estudo ser tomado como unidade como é feito nos dias atuais. Até o século XVIII as forças elétricas e magnéticas eram interpretadas como fenômenos distintos (SILVA, 2002) mas seria com o experimento de Hans Oersted (1777 – 1851) e a síntese elaborada por Maxwell – aperfeiçoada por seus seguidores na segunda metade do século XIX – que estes conceitos começariam a serem visto como interligados, tanto empírica quanto matematicamente (DARRIGOL, 2000).

Os primeiros registros conhecidos de fenômenos elétricos ou magnéticos são provenientes da China. Por volta de 2600 a.C., são descritas situações que fazem a crer a existência de um objeto com propriedade semelhante à uma agulha magnética²⁹ (TONIDANDEL; ARAÚJO; BOAVENTURA, 2018). Na antiga Grécia, na época de Tales de Mileto (570 a.C.), há registros da observação do efeito atrativo entre alguns materiais, conhecido como efeito pedra-ímã, e também que o âmbar esfregado exerce em determinados objetos (PESSOA JUNIOR, 2010). O termo “pedra-ímã” designa qualquer amostra natural de minério que tenha magnetização permanente. Devido a essa característica, a pedra-ímã possui uma propriedade diretiva, isto é, possui a capacidade de orientar-se em relação ao meridiano que liga o norte

²⁹Segundo Mottelay (1922, p. 1) em 2637 a.C., as tropas do imperador chinês Hoang-ti se perderam durante uma perseguição às tropas do príncipe Tchi-yu. Com isso, Hoang-ti construiu uma carruagem sobre a qual uma escultura de figura feminina era capaz de girar e apontar o sul, indicando assim os quatros pontos cardinais. Nas palavras do historiador, esse relato “*has been conclusively shown to be the earliest one at which history notes anything resembling the application of the magnetic influence*”.

e o sul, semelhante às bússolas magnéticas (PESSOA JUNIOR, 2010). Também pode ser referida como “pedra magnetita” ou apenas “magnetita”.

Na época, alguns materiais atritados transferiam determinadas “virtudes”, com propriedades similares ao da pedra-ímã (TONIDANDEL et al., 2018). De acordo com Pessoa Junior (2010, p. 200) o efeito da pedra-ímã foi observado independentemente pelos habitantes da América Central, Europa, e China; mas apenas na América Central e na China descobriu-se a sua propriedade diretiva.

Segundo Tonidandel et al. (2018) seria, talvez, com Lucretius (99 – 55 a.C.) no século I a.C. que a humanidade tentaria uma explicação, para além de uma descrição, de um fenómeno magnético. Posteriormente, Santo Agostinho (354 – 430) no século V relata uma observação acerca da pedra-ímã: embora ela não fosse capaz de mover a palha, ela atraía o ferro. Pessoa Junior (2010, p. 202) resume que a agulha magnetizada por contato com uma pedra-ímã surgiu em torno de 400 d.C. A partir de aproximadamente do ano 850 apareceram diferentes espécies de bússolas de precisão feitas de tais agulhas. Contudo, somente no século XIII que mais referências ao magnetismo, principalmente à utilização da bússola por marinheiros, começariam a aparecer em diversos escritos europeus (PESSOA JUNIOR, 2010; TONIDANDEL et al., 2018).

Um importante passo no estudo do magnetismo foi dado com o francês Petrus Peregrinus (1240 – ??) que em 1269, após investigações experimentais com uma esfera de pedra-ímã, escreve uma carta a um amigo reconhecendo que o polo norte da pedra-ímã atrai o polo sul de outra pedra-ímã enquanto os mesmos polos se repeliam, além de outras propriedades e efeitos dos ímãs naturais (PESSOA JUNIOR, 2010; TONIDANDEL et al., 2018). Peregrinus talvez tenha sido a primeira pessoa a apresentar um método para determinação de polos de um ímã e utilizar a expressão “polo” para se referir a um polo magnético³⁰ (CHAIB; ASSIS, 2007).

Séculos mais tarde, em 1550, Jerome Cardan (1501 – 1576) registraria que a magnetita e o âmbar possuem qualidades de atração distintas – embora ambos agissem sobre a matéria, não o faziam do mesmo modo (ROLLER; ROLLER, 1957). Posteriormente, um passo importante para o início da

³⁰Uma pequena observação da distinção entre as duas terminações da pedra-ímã teria sido registrada poucos anos antes por Roger Bacon (TONIDANDEL et al., 2018).

investigação sistemática de fenômenos magnéticos e elétricos foi o livro *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure* [Sobre os Ímãs, os Corpos Magnéticos e o Grande Ímã Terrestre] escrito em 1600 pelo inglês William Gilbert (1544 – 1603).

A partir do trabalho de Peregrinus, Gilbert incorporou a enorme quantidade de observações a respeito de ímãs e efeitos magnéticos, e também efetuou experimentos de eletrostática com diferentes materiais para além do âmbar. Gilbert classificou os materiais em elétricos e não elétricos caso eles atraíssem ou não atraíssem corpos leves, respectivamente (CHAIB; ASSIS, 2007; PESSOA JUNIOR, 2010; TONIDANDEL et al., 2018). Stephen Gray (1666 – 1736) em 1729 ao distinguiu experimentalmente corpos isolantes e condutores (CHAIB; ASSIS, 2007; SOUZA FILHO, 2009).

De modo geral, a partir de Gilbert, o magnetismo apresentaria uma forma não-corpórea, agindo por união e concordância, ao passo que a eletricidade seria material, agindo por força e coesão através de eflúvios invisíveis (PESSOA JUNIOR, 2010). Assim, tinha-se uma nova maneira de pensar sobre a atração: o corpo que atraía o outro preenchia o espaço ao seu redor com alguma espécie de fluido (SIQUEIRA; PIETROCOLA, 2004). Em 1747 o americano Benjamin Franklin (1706 – 1790) apresenta a teoria de um fluido elétrico único (BELÉNDEZ, 2008), uma novidade, visto que com Gray e principalmente com Charles Du Fay (1698 – 1739), havia o entendimento de dois tipos diferentes de eletrização. Contudo, a concepção de fluido único de Franklin não teve muito sucesso na Europa (DARRIGOL, 2000).

Em 1795, Charles Coulomb (1736 – 1806) justificava a sua lei para força elétrica com o inverso do quadrado da distância assumindo a existência de dois fluidos elétricos diferentes, positivo e negativo. Ademais, justificava a impossibilidade de isolar um polo magnético, uma vez que os fluidos magnéticos estariam aprisionados na matéria magnética, sendo propriedade intrínseca dos corpos magnéticos. Mais importante, que a eletricidade e o magnetismo eram de natureza fundamentalmente distintas, e a geração de efeitos magnéticos a partir da eletricidade era impensável³¹ (GARDELLI, 2018; DARRIGOL, 2000).

³¹A invocação de fluidos invisíveis ou meio sutis para explicação de fenômenos físicos extrapolava o magnetismo e a eletricidade, apresentando também exemplos no calor e na gravitação. As qualidades desses meios se complexificaram no decorrer dos séculos XVIII e

Para Darrigol (2000, p.3, tradução nossa) embora a eletricidade e o magnetismo compartilhassem de analogias parecidas – com fluidos, por exemplo – eles ainda eram pensados como diferentes fenômenos: “eletrização requeria uma violenta ação e implicava em violentos efeitos como faíscas ou raios, enquanto magnetismo se mostrava como uma força silenciosa”. Gardelli (2018) sintetiza o avanço científico dos últimos séculos precedentes à experiência de Oersted:

No final do século XVIII não havia um consenso entre os filósofos da natureza a respeito da possibilidade de interação física entre eletricidade e magnetismo. Os seguidores do chamado Programa de Pesquisa Laplaciano acreditavam que os fenômenos elétricos eram de natureza distinta dos fenômenos magnéticos e que, portanto, uma interação eletromagnética seria impossível de ser observada. Entretanto, os membros da corrente filosófica conhecida por *Naturphilosophie* defendiam a possibilidade de inter-relação entre os diferentes fenômenos observados na natureza, inclusive os elétricos com os magnéticos (GARDELLI, 2018, p.118).

4.2. O eletromagnetismo no século XIX

Em 1820, Oersted demonstrou que uma agulha imantada de uma bússola se mexia quando próxima a ela passava um fio conduzindo corrente elétrica (MARTINS, 1986; SOUZA FILHO, 2009; DARRIGOL, 2000), e a partir dessa experimentação Oersted foi capaz de oferecer valiosas conclusões que serviriam para a investigação dos físicos. Embora Oersted também acreditasse na existência de dois fluidos elétricos (GARDELLI, 2018), as principais diretrizes que seguiram dos seus experimentos foram: a eletricidade não é confinada ao condutor, mas atua também em sua vizinhança próxima, e que a eletricidade forma um “vórtice” em volta do fio condutor (DARRIGOL, 2000, p. 5).

O experimento de Oersted, mais do que oferecer um indicativo de resposta para a relação entre eletricidade e magnetismo, levantou um problema conceitual, ilustrado por Martins (1988, p. 50) “como é que uma corrente elétrica, que tem direção paralela ao fio, pode criar algo que gira em certo sentido em torno dele?” Essa pergunta foi uma grande dificuldade a ser superada – e compreendida – durante todo século XIX. Somente com o trabalho de Pierre Curie em 1894, que tínhamos uma imagem geométrica satisfatória para o eletromagnetismo. Com o resultado de Curie “é impossível

XIX (BEZERRA, 2006) e de certa forma delinearão a noção de éter na segunda metade do século XIX.

que tanto o campo elétrico quanto o campo magnético sejam vetores, ao mesmo tempo”, Martins adiciona: “uma teoria eletromagnética coerente só pode ser formulada se um deles for um vetor (polar) e o outro um pseudovetor (axial)” (ibidem, p. 54). Por não ser imprescindível ao entendimento de nosso modelo, não trabalharemos características e consequências dessa distinção, e usaremos a nomenclatura usual de *vetor* ao nos referirmos aos campos elétricos e magnéticos³².

A partir do trabalho de Oersted, mas sob outro ponto de vista, Michael Faraday (1791 – 1867) sistematicamente evitaria tanto a existência de fluido elétrico quanto a ideia de fluido magnético. A partir de seus experimentos com agulha imantada e corrente elétrica, Faraday começou a se referir aos polos como centro de ação da força magnética, o que permitiu, a partir desse entendimento, que polos fossem produzidos por correntes elétricas – deixando de serem específicos dos corpos magnéticos, como havia sido sugerido por Coulomb.

Mesmo assim, uma noção de fluido ainda estava presente com James Maxwell (1831 – 1879), que entendia eletricidade de forma análoga ao escoamento de um fluido incompressível. Contudo, destacamos a delicadeza de falar sobre as “ideias de Maxwell” uma vez que, entre seu primeiro artigo sobre eletrodinâmica em 1856 “*On Faraday’s line of force*” e o “*Treatise on electricity and magnetism*” de 1873, o entendimento de Maxwell sobre a matéria e éter mudaram e nem sempre eram claras (BEZERRA, 2006). Por esse motivo alguns de seus contemporâneos geralmente preferiam se referir apenas à sua matematização³³.

Posteriormente, uma rejeição contundente dos fluidos elétricos seria vista na teoria eletrodinâmica de Heinrich Hertz (1857 – 1894), visto que para ele seria o ‘*ether field*’ a fundação teórica da qual os outros conceitos seriam derivados³⁴ (DARRIGOL, 2000, p.258).

³² Rigorosamente, no formalismo atual, o campo eletromagnético e suas interações com a matéria são descritos a partir de tensores (PURCELL, 1970, p.195-199; SAVELYEV, 1980).

³³ Por exemplo, Hertz chegou a declarar “*To the question, 'What is Maxwell's theory?' I know of no shorter or more definite answer than the following:-Maxwell's theory is Maxwell's system of equations*” (HEIMANN, 1971, p.156). Helmholtz adicionaria à fala do compatriota “*I confess I would be at a loss to explain without the help of mathematical formulae what [Maxwell] considers as a quantity of electricity, and why such a quantity is constant, like that of a substance*” (DARRIGOL, 2000, p. 274).

³⁴ Os resultados de Hertz foram tão bem sucedidos que alguns físicos, como Georg FitzGerald, afirmaram que os experimentos de Hertz provavam a existência do éter eletromagnético (DARRIGOL, 2000, p. 252).

Em meados de 1900 havia certo sentimento geral entre os cientistas da época envolvidos com o estudo do eletromagnetismo: em relação à matéria e ao éter, o físico Emil Wiechert (1861 – 1928) resumizou “Matéria e éter: são apenas imagens que vemos na natureza do ponto de vista humano; para decidir o que corresponde a essas imagens na realidade é deixado para o progresso futuro da ciência”³⁵. A concepção de um éter eletromagnético era compartilhada por quase todos – exceto os que acreditavam em uma ação direta à distância – mas certamente não havia consenso sobre suas características (SILVA, 2002).

Em suma, o eletromagnetismo do século XIX, teve muitas abordagens diferentes, com diferentes níveis de rigor matemático e precisão experimental. Os desacordos eram a regra e os consensos às exceções. Debates se estendiam desde a existência do éter, interpretação da corrente elétrica e indução eletromagnética até a validade do princípio da relatividade e a necessidade de uma interpretação atômica da matéria³⁶ (DARRIGOL, 2000). Além disso, Silva (2002) pontua

A física do século XIX tinha uma grande preocupação em interpretar mecanicamente os fenômenos e por isso foram construídos modelos mecânicos para descrever os fenômenos eletromagnéticos. Esses modelos foram baseados em analogias com fluxo de calor a partir do trabalho de Fourier, em modelos hidrodinâmicos e em modelos de meio elásticos desenvolvidos por Stokes, Thomson, Green e outros (SILVA, 2002, p. 52).

Entretanto, mesmo com as idas e vindas entre os modelos eletromagnéticos desenvolvidos na Europa continental e na Grã-Bretanha, parece haver, segundo nosso entendimento, alguns conceitos que se mostraram essenciais à estruturação das fundações físicas teóricas que permitiam a compreensão dos fenômenos relacionados ao eletromagnetismo.

Sugerimos, nesse momento, que estes podem ser os conceitos que se relacionam com as ideias de “movimento”, “variação” e “interação”. Apresentamos os conceitos do modelo teórico (que são os conceitos TCU) entre aspas. Isso reflete apenas um recurso lógico-linguístico para não nos comprometermos ontologicamente com os nomes. Ou seja, queremos que as palavras “movimento”, “variação” e “interação”, possuam conotações

³⁵ “Matter and ether: are only pictures that we see in nature from our human standpoint; to decide what corresponds to these pictures in reality is left to the future progress of science” (DARRIGOL, 2000, p. 347).

³⁶ Até 1800, eram comuns especulações sobre a essência da eletricidade ou do magnetismo. Essa prática esfriou consideravelmente, e hipóteses em relação à natureza de elementos da eletricidade ou do magnetismo eram evitadas por vários dos protagonistas do século XIX.

semânticas amplas, e não denotem ou se refiram a um movimento em particular, vide discussão em Reimer e Michaelson (2019), Braquinho, Gomes e Murcho (2006, p. 610-617) e Krause (2017).

Com essas sugestões de conceitos TCU, poderemos direcionar nossa atenção ao longo das próximas seções para melhor construirmos argumentos de porque estes, e não outros (como campo eletromagnético ou carga elétrica) podem formar um modelo teórico para o ensino de eletromagnetismo.

Quadro 1. Representação do modelo teórico para o ensino de eletromagnetismo clássico a partir dos conceitos TCU.

Os conceitos TCU estão todos relacionados entre si, e sua disposição espacial é arbitrária no quadro 1. Ou seja, é indiferente qual conceito fica mais embaixo ou à esquerda, não havendo hierarquia entre eles. Os conceitos estão intimamente relacionados e em diversos momentos se misturam, se somam e se concretizam de diferentes maneiras nas atividades de pesquisa e ensino. Mudanças em qualquer um dos conceitos refletem em mudanças por todo o modelo teórico (HEDEGAARD, 1996). Lembramos que os conceitos se referem às *relações*, e não são tidos *per si*, conforme vimos no capítulo 3 ao discutirmos o referencial teórico³⁷.

A expressão *relações centrais* que formam o modelo teórico pode passar uma impressão que a apresentação do modelo causaria um sentimento de epifania em um esclarecedor entendimento como “um raio dos céus” (CHAIKLIN, 1999, p. 197) ou que em certo sentido as relações não passam de trivialidades.

Contudo, este último sentimento – expressados em interjeições como: claro! É óbvio que é isso! – é uma consequência esperada do modelo teórico uma vez que o modelo fornece uma maneira de organização das relações mais

³⁷ Lembramos que as relações não são abstrações formais, mas dependem do conteúdo do objeto analisado.

básicas, essenciais do conteúdo. O que de fato surpreenderia seria caso o modelo teórico para o ensino de eletromagnetismo fosse expresso por relações que **não** aparentam serem as mais fundamentais, tal como a relação entre R^2 e $\frac{4L}{C}$ em um circuito R - L - C , por exemplo³⁸.

4.3. Análise dos conceitos constituintes do modelo teórico

Vamos nas seções subsequentes retomar individualmente os conceitos TCU em sua construção histórica, dando mais atenção às suas presenças na explicação dos fenômenos eletromagnéticos e sugerindo suas universalidades.

4.3.1 Movimento

Considerações a respeito do “movimento”³⁹ no eletromagnetismo começaram com observações da época anterior a Cristo, na qual alguns materiais atritados transfeririam determinadas “virtudes”. Atritar o âmbar permitia que *algo* fosse “transferido” para outro material como a seda, por exemplo. Outra constatação importante foi durante o período das navegações. O *movimento* da agulha da bússola era independente do movimento do navio. Sua orientação mantinha-se alinhada com o Sul magnético terrestre. Para a sociedade ocidental, até a metade do século XVIII, a principal propriedade da eletricidade até era o *movimento* de atração ou repulsão dos objetos, e a eletrização se dava principalmente por atrito, que como sabemos precisa de movimento para acontecer.

Com a invenção da garrafa de Leiden⁴⁰, a eletricidade conseguia ser armazenada (JARDIM; GUERRA, 2017) para depois ser liberada, apresentando um “*movimento*” materializado em brilhantes faíscas. Com a pilha de Volta – já no início do século XIX – o “*movimento*” da eletricidade era observado pelo contato de pares metálicos em série. As diferentes formas de observação do movimento da eletricidade – produzidos pela eletrização por atrito ou por fenômenos galvânicos – era fonte de desacordo em relação à natureza da eletricidade (MARTINS, 1999).

³⁸ A ordem de grandeza de R (em comparação com L e C) determinará se o circuito está subamortecido, criticamente amortecido ou superamortecido (YOUNG; FREEDMAN, 2009, p. 333-336). De qualquer modo, estes estados não passam de características de um *movimento* ou de uma *variação* da carga elétrica no circuito (como era de se esperar).

³⁹ O conceito TCU “movimento” também pode ser concebido como “transporte” em algumas situações relacionadas à radiação eletromagnética, por exemplo.

⁴⁰ Equipamento que funciona como um capacitor (ou condensador elétrico) armazenando cargas elétricas através da eletrização por contato.

Em julho de 1820 com o experimento de Oersted, galvanismo e magnetismo se mostram entrelaçados e o *movimento* de uma agulha imantada é suscetível à *passagem* de corrente elétrica. Cinco meses depois, com engenhosos aparatos experimentais, André-Marie Ampère (1775 – 1836) propunha a redução do magnetismo ao *movimento* da eletricidade. Em setembro de 1821, as observações experimentais de Faraday culminaram na exclusão da interpretação que o movimento da agulha imantada – em uma experiência semelhante à de Oersted – era resultado da atração ou repulsão entre os polos e o fio.

Em 1824 François Arago (1786 – 1853) nota que o *movimento de rotação* de um disco de cobre pode ser reduzido na presença de um ímã próximo. Em 1832, Faraday apresenta sua lei de indução eletromagnética e uma noção de *movimento* relativo para compreensão dos fenômenos eletromagnéticos é apresentada: indefere se é o fio que transporta a corrente que se move de maneira a cortar as linhas de forças magnéticas ou se são as linhas de força magnética movidas de maneira a passar pelo fio⁴¹.

Na década de 1850, Wilhelm Weber (1804 – 1891) sugeria a redução de todos os fenômenos elétricos ao *movimento mecânico de fluidos elétricos*. No início dos anos 1860, Maxwell admitiria – através de um mecanismo desconhecido – que a existência de corrente elétrica implica um *movimento* no campo magnético circundante e os fenômenos eletromagnéticos são resultados do deslocamento das partículas que constituem um éter sólido elástico. Na metade da década de 1880, Poynting assumiu que toda força eletromotriz de um circuito era devido ao *movimento dos tubos*⁴² de indução magnética. Segundo J.J. Thomson, um campo magnético corresponderia a *um movimento transversal* aos tubos de força elétrica⁴³.

⁴¹ A hipótese de movimento relativo para interpretação da corrente induzida em um condutor por um ímã – embora hoje saibamos ser correta – apresentava algumas assimetrias dependendo se fosse o ímã ou o condutor que movia no éter. A descrição de Faraday de indução unipolar era diferente dependendo de qual objeto se movimentava. Oliver Heaviside, August Föppl e Tolver Preston notaram essa assimetria, mas a solução só viria com Albert Einstein e com o desuso do éter como referencial (DARRIGOL, 2000, p. 377-380).

⁴² A visualização das linhas de força se complexificaram com o tempo e eventualmente culminaram no termo tubos de força. O termo “*tube*” foi utilizado anos antes por Maxwell para se referir à lei de indução eletromagnética de Faraday. Assim, ao invés de utilizar o termo de Faraday “*lines of force*”; Maxwell, Poynting e outros também utilizaram “*tubes of force*”.

⁴³ A referência foi omitida do penúltimo parágrafo da seção 4.3.1 para facilitar o encaminhamento do texto. Todos os trechos se referem à obra de Darrigol (2000), e fazem referência às páginas 12, 18 e 36, 35, 66, 157, 183, 298 para os episódios que relatam Ampère, Faraday, Arago, Weber, Maxwell, Poynting, J.J. Thomson, respectivamente.

Desse modo, vemos que para uma variedade de fenômenos que envolvessem a eletricidade ou o magnetismo, uma tentativa de explicação associada ao “movimento” de “algo” era presente em muitos (quijá todos) que estudavam os fenômenos eletromagnéticos. As formas desse “movimento”, suas propriedades, características e modelos variavam significativamente.

4.3.2 Variação

Estreitamente ligado ao conceito “movimento”, temos o conceito de “variação”. Há muitas formas de uma grandeza variar. Em se tratando de Física, é comum as grandezas variarem no tempo e no espaço⁴⁴. Por exemplo, se em um determinado momento a temperatura de um recipiente possui valor de 10°C e em um momento posterior a temperatura possui valor de 15°C, dizemos que a temperatura mudou com o tempo (o espaço se manteve constante uma vez que não alteramos o recipiente).

Semelhante ao *movimento*, o conceito de *variação* depende de um referencial a ser fixado. Porém, mais complexo do que movimento, *variação* pode ser interpretada como um “*movimento do movimento*”. Explicamos: um carro *que já se movimenta* na estrada com velocidade de 30 m/s passa a ser mover a 35 m/s – aqui, a velocidade é uma grandeza que variou no tempo e no espaço da estrada – percorrido pelo carro enquanto acelerava. Ou, um fluido *que já movimenta* linearmente em uma tubulação até encontrar regiões de diferentes pressões e rapidamente altera a taxa de seu escoamento. Modelar sistemas físicos que mudam no tempo ou no espaço é uma tarefa analiticamente complicada – muitas vezes impossível – e recursos como cálculo diferencial e integral, equações diferenciais, aproximações e simulações numéricas computadorizadas são necessários⁴⁵. No contexto do eletromagnetismo, daremos especial atenção à indução eletromagnética, um tópico muito importante quando falamos de “variação”.

Segundo a nossa interpretação, desde atritar o âmbar há mais de dois milênios até a década de 1820, físicos não se ocuparam tanto de documentar

⁴⁴Algumas grandezas são ditas constantes em certos sistemas ou regimes. Energia, carga elétrica, momento linear e momento angular são alguns dos exemplos mais conhecidos.

⁴⁵Modelagem climática é um exemplo moderno que se ocupa de “movimentos futuros” – no caso, o que chamamos de “movimento do movimento”. Há ampla literatura no debate sobre “determinismo” nas ciências físicas. Enquanto que de um lado temos o demônio de Laplace, por outro temos o caráter probabilístico da mecânica quântica (PESSOA JUNIOR, 2005). Não discutiremos esses meandros aqui – lembramos que estamos interessados nos casos descritos pela física clássica – e que “*movimento*” é uma relação, não um fim em si mesmo.

estudos sobre o conceito de “variação” no eletromagnetismo. Isso começaria a mudar por volta de 1825 quando Georg Ohm (1789 – 1854) se apropria da teoria de transferência de calor de Jean-Baptiste Fourier (1768 – 1830) para expor sua teoria de condução elétrica. Na teoria matemática de condução da eletricidade de Ohm, a densidade de corrente elétrica era proporcional ao *gradiente*⁴⁶ da força elétrica (DARRIGOL, 2000, p.43). Em agosto de 1831, Faraday imagina um novo aparato experimental, mais sensível, para retomar alguns de seus experimentos de 1825. Com isso ele notaria um claro efeito transiente na agulha imantada – que durava apenas um instante – que oscilava indicando a passagem de corrente elétrica antes de voltar ao repouso.

Assim, a corrente induzida em um circuito próximo dependia da variação da corrente indutora – e não do seu movimento constante (SILVA; MARTINS, 2003, p. 402; DARRIGOL, 2000, p. 32-36). No ano seguinte, Faraday condensaria seus resultados em uma lei que atualmente enunciamos como: “a força eletromotriz induzida em uma espira fechada é dada pela taxa de *variação do fluxo* magnético, com o sinal negativo, através da área delimitada pela espira”⁴⁷ (YOUNG; FREEDMAN, 2009, p. 283). Assim, segundo a lei de Faraday – ou lei da indução eletromagnética – um campo magnético que varie em função do tempo pode atuar como fonte de campo elétrico – o oposto também é válido, um campo elétrico que varie pode atuar como fonte de campo magnético.

Dois anos mais tarde, em 1834, Heinrich Emil Lenz (1804 – 1865) apresenta sua lei qualitativa que complementa o entendimento das correntes induzidas de Faraday de tal maneira que o sentido da corrente induzida em um circuito se opõe à *variação* do fluxo magnético através do circuito. A partir dos resultados de Ampère e Lenz; em 1845, Franz Neumann (1798 – 1895) contribui para a temática de corrente induzida: indução depende apenas do *movimento relativo* entre o condutor e o ímã, e a integral da força eletromotriz em um circuito depende da variação do seu potencial⁴⁸ (DARRIGOL, 2000,

⁴⁶Gradiente é um termo moderno para se referir ao operador del, representado pelo símbolo nabla, que quando aplicado à uma função f apresenta a forma: $\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{k}$. Assim, ∇f é um vetor que nos diz como a função f varia nas vizinhas de um ponto. Aqui temos uma expressão matemática para um entendimento de “variação”.

⁴⁷Nas palavras de Faraday “If a terminated wire moves so as to cut a magnetic curve, a power is called into action which tends to urge an electric current through it” (DARRIGOL, 2000, p. 36).

⁴⁸Neumann apresentou seu princípio geral para sua teoria matemática de correntes induzidas como “The integral electromotive force in a circuit is given by the variation of its potential calculated as if the current in this circuit had the intensity ϵ ” (DARRIGOL, 2000, p.47).

p.45-47). Para nossa discussão, o mais importante resultado de Neumann foi a conclusão sobre o papel da *variação* do potencial:

não importa como a variação do potencial é produzida, se é pelo deslocamento do circuito ou do ímã, se é deformando o circuito, se é movendo suas partes em contato, ou se é pela variação da intensidade da corrente indutora ou do ímã (ibidem, p.47, tradução nossa).

Posteriormente viria a contribuição de Maxwell, ao expressar a lei de Faraday de indução eletromagnética em termos dos tubos. No caso de um circuito fechado, a força eletromotriz induzida depende da *variação* do número de tubos passando pelo circuito (SILVA, 2002, p. 34).

Desse modo, ilustrado a partir da indução eletromagnética, temos que a ideia de “variação” parece ser um conceito essencial no eletromagnetismo⁴⁹. Para gerar campo magnético, não basta a passagem de corrente elétrica em um condutor, é preciso que essa corrente varie no tempo. Por fim, nesta seção estávamos principalmente interessados em “variação” ligado ao “movimento”. Contudo, temos a conhecida expressão “variação de potencial elétrico” na qual diferentes regiões do espaço possuem diferentes valores para o potencial elétrico. Essa variação de potencial elétrico entre duas regiões do espaço faz surgir um campo elétrico que pode colocar cargas elétricas próximas em movimento, noutras palavras, produzir corrente elétrica⁵⁰.

4.3.3. Interação

Em conjunto com as primeiras observações da movimentação de objetos eletrizados, temos também especulações sobre a interação entre eles. Sendo a ciência também um aspecto cultural, predominava um caráter místico nas justificativas antigas para interações eletromagnéticas. Na antiga China dominavam explicações do magnetismo baseada no movimento do *chhi*, algo como uma energia vital (PESSOA JUNIOR, 2010); na América Central, estudos das construções de estruturas arquitetônicas dos Olmecas por volta de 1000 a.C., indicam propriedades magnéticas relacionadas ao uso cerimonial (CARLSON, 1975, p. 757-758).

⁴⁹Há também outros fenômenos envolvidos com o conceito de “variação”, como perdas de energia em linhas de transmissão, efeito pelicular, geração de energia elétrica, entre outros.

⁵⁰Esse exemplo pode ser mais facilmente assimilável do ponto de vista da variação do potencial gravitacional: uma bola em cima de uma rampa acelera para baixo em função da diferença de potencial gravitacional entre a parte de cima da rampa e a parte de baixo.

Muito depois, na Europa medieval para Idade Moderna, eram percebidos *dois tipos de interação*: atração e repulsão e posteriormente, que atração e repulsão eram distintas dependendo caso fosse utilizado à magnetita ou o âmbar. Assim, até esse momento temos pelo menos *2 pares diferentes de interações*: (i) atração e repulsão a partir dos efeitos da magnetita (ii) atração e repulsão com o uso do âmbar. Destacamos também uma ideia de “emanação”, de algo que sai dos corpos e preenche o espaço ao seu redor, agindo nos corpos próximos. A partir do século XVII – mas principalmente no século XVIII – surgiria a noção de “fluidos” invisíveis para justificar as *interações* elétricas.

A noção de fluido como agente na *interação* dos elementos elétricos e magnéticos sofreria críticas. Alessandro Volta, a partir dos seus experimentos que dariam origem a uma pilha elétrica, propôs que a tensão elétrica se originava no contato entre os diferentes metais (DARRIGOL, 2000, p.3). Ampère, por outro lado, descrevia as *interações* eletrodinâmicas por ação à distância entre elementos de corrente, sem qualquer mediação (CHAIB; ASSIS, 2007, p.68). Em uma visão combinada de fluido e ação à distância, a *interação* dos fenômenos para Pierre Laplace (1749 – 1827) e seus discípulos se dava através de forças centrais que agiam entre partículas dos fluidos (DARRIGOL, 2000, p.1).

Para Faraday, tanto o fluido quanto o contato direto não seriam interpretações adequadas, e para ele o espaço entre as cargas ou entre ímãs era preenchido por “algo” que empurrasse ou puxasse as cargas ou ímãs (MAGALHÃES; SANTOS; DIAS, 2002, p.493). Posteriormente Faraday pensaria em termos de forças elétricas e magnéticas que eram propagadas através de “*estresses*” do meio (DARRIGOL, 2000, p.126). Para o físico inglês, as forças magnéticas e elétricas eram uma espécie de linhas elásticas que se estendiam no espaço a partir de ímãs ou corpos eletrizados chamando-as de linhas de força (ROCHA, 2009, p.1609).

Assim, Faraday tinha a ideia de *interação* por meio de forças contínuas no espaço, não era ação à distância, nem ação por contato. Com base em Faraday, Maxwell gradualmente aceitou a presença de uma substância que preencheria todo o espaço, sendo responsável pela transmissão – ou interação como um todo – dos efeitos eletromagnéticos. Essa substância era entendida sob o ponto de vista do seu modelo mecânico para o éter. A partir de Maxwell, uma noção de campo com o tempo ganharia espaço no eletromagnetismo. Em

certo sentido, delimitações de “campo” e “éter” se confundem⁵¹, e sobre esse aspecto, Bezerra (2006) comenta

A teoria do campo irá gradualmente ocupar um espaço conceitual intermediário entre a ação a distância e ação por contato – a saber, a *ação contínua*. Porém, a teoria “pura” do campo não é o único tipo de teoria que pode se encaixar nesse espaço: ali também podem alojar-se as teorias dos meios sutis e do éter, bem como teorias híbridas de campo-com-éter (BEZERRA, 2006, p. 185).

Com isso, tinha-se pouco após a metade do século XIX, pelo menos *três grandes interpretações de interação* dos fenômenos eletromagnéticos: ação à distância, ação por contato e ação contínua⁵².

Nas décadas de 1870 e 1880, com o estudo da descarga elétrica em gases, surgiria uma nova concepção de *interação*, que segundo Darrigol (2000), era o começo de um entendimento pautado na ideia que propriedades eletrodinâmicas da matéria se reduzem a *interação entre íons*. Hendrik Lorentz (1853 – 1928), na última década do século, tentaria aplicar as equações de Maxwell e reduzir todos os fenômenos eletromagnéticos a interações de partículas carregadas através de um éter estacionário – e sem interagir com o éter. Depois, Emil Wiechert (1861 – 1928), com a descoberta dos raios-X, defenderia que a *interação* entre a matéria e o éter seria apenas através de elétrons.

Com essa breve reconstrução histórica, vemos que o eletromagnetismo passou por diferentes modelos, e até diferentes interpretações para um mesmo modelo, a exemplo de Ampère, Faraday, Weber, Maxwell, Fitzgerald, Lodge. Contudo, o mais importante para nós é notar que independentemente do modelo, todos envolviam alguma ideia sobre “movimento”, “variação” e “interação” como tentativa de caracterizar e justificar os fenômenos eletromagnéticos.

⁵¹ Acompanhar histórica – e matematicamente – a sinuosa mudança da noção de “éter” – luminífero, gravitacional, elástico – presente na época de Newton ao conceito de campo eletromagnético moderno é uma tarefa hercúlea e nem sempre consensual entre os historiadores. Também poderíamos levar em consideração um ponto de vista ontológico desse conceito, complexificando ainda mais o tema. Como exemplo, temos Bezerra (2006, p. 207, grifo do autor) ao dizer que “a teoria de Maxwell é uma teoria do *campo* eletromagnético, mas, ao mesmo tempo, é também uma teoria do *éter* eletromagnético”.

⁵² Esse quadro ainda aumentaria com a eletrodinâmica de Hermann Helmholtz (1821 – 1894). Para Helmholtz, todos os fenômenos físicos eram analisados em termos da interação de energia entre diferentes pares de objetos – como cargas e corrente – sem nenhuma mediação! O éter apenas somaria como um objeto interagente na concepção helmholtziana (BUCHWALD, 1994, p. 23-24).

4.4. Comentários sobre o modelo teórico

Como vimos no quadro 1, nosso modelo teórico é constituído pelos conceitos TCU de *movimento*, *variação* e *interação*, que combinados são a gênese das abstrações que delimitam uma “eletromagneticidade”. Isso ainda pode causar estranheza por deixarmos outros conceitos muito difundidos de fora de nosso modelo. Assim, dedicamos essa seção para darmos especial atenção ao conceito de campo e justificar porque talvez o mais emblemático conceito da teoria eletromagnética atual ficou de fora⁵³.

4.4.1. Por que *campo* não é um conceito TCU?

Atualmente, o eletromagnetismo clássico adota noções de campo, e as equações de Maxwell – com consideráveis aperfeiçoamentos e contribuições de Helmholtz, Heaviside, Lorentz e outros – para interpretação e explicação dos seus fenômenos⁵⁴. Porém, mesmo nos dias atuais – e no contexto do eletromagnetismo clássico – definições de campo elétrico (ou magnético) são variadas e não é muito claro o consenso para além da matematização.

Por exemplo, Rocha (2009, p. 1606) se refere a campo como “o campo é visto como uma espécie de ‘substância eletromagnética’ com uma única estrutura”, enquanto Hewitt (2002, p. 380) o entende como “uma espécie de aura que se estende através do espaço”. Segundo Oliveira (2019, p. 15) o campo elétrico “pode ser imaginado como um ‘campo de linhas invisíveis’ no qual o centro é a própria carga que o gerou”.

Serway e Jewett (2004, p.685) preferem adotar uma descrição mais pragmática: “um campo elétrico existe em um ponto se uma partícula de prova carregada colocada em repouso nesse ponto experimentar uma força elétrica”. À luz dessa interpretação, Bezerra (2006) adiciona um ponto importante: o

⁵³Um raciocínio análogo ao apresentado pode ser feito para justificar porque conceitos como *carga*, *potencial* e *força* não constituem o quadro 1 dos conceitos TCU.

⁵⁴Há, contudo, físicos que defendem uma eletrodinâmica diferente da usual (maxwelliana). Por exemplo, o pesquisador e professor André Assis (IFGW – UNICAMP) que advoga pela eletrodinâmica de Weber. Na teoria de Weber, a eletrodinâmica é construída a partir de cargas elétricas e forças a distância, não necessitando interpretações de campo como mediadores das forças elétricas e magnéticas. A principal diferença entre as duas interpretações – de Maxwell e de Weber – reside então no mecanismo de interação entre as cargas (ASSIS, 1998, p. 10). Assis chegou a propor, em alguns de seus artigos, procedimentos que poderiam ser realizados para definir se a eletrodinâmica de Weber prevê corretamente resultados experimentais (ASSIS, 1995). Experimentações foram feitas – descritas em Cavalleri et al. (1998), Junginger e Popovic (2004), Lörincz e Tajmare (2007) (esses 3 artigos citam diretamente os trabalhos de Assis) – e esses autores chegaram a conclusão que alguns fundamentos da eletrodinâmica de Weber não devem ser corretos, uma vez que os resultados experimentais por eles obtidos não coincidiram com a expectativa teórica weberiana.

campo tem – assim como outros constructos matemáticos, como o potencial – uma propriedade disposicional, que é necessária, porém insuficiente para caracterizar o campo:

Dizer que existe um campo numa dada região do espaço significa que, se um corpo fosse colocado na posição X dentro dessa região, *então* ele sofreria a ação de uma força com tais e tais características – mesmo que o corpo de prova não tenha sido efetivamente colocado ali [...] Pode-se então acrescentar à visão disposicional certas condições mais fortes, como a ideia de que a propagação da ação por meio do campo leva um tempo finito (isto é, não é instantânea), e/ou a ideia de que a ação se dá por contiguidade, entre elementos infinitesimais adjacentes que, juntos, constituem uma quantidade finita (BEZERRA, 2006, p.183).

Em análise do conceito de campo em diferentes livros didáticos, Silva e Krapas (2007) e Krapas e Silva (2008) apontam múltiplas atribuições dadas ao termo campo a depender do livro e do autor, a saber: campo é região; campo é vetor; campo é alteração do espaço; campo como curvatura do espaço; campo armazena energia; campo interage com partículas, media a interação entre elas; campo se propaga, é suporte para a propagação de energia; campo preenche o espaço. Por fim, Purcell (1970) bem resume a discussão sobre campo:

Talvez você ainda queira perguntar: que é um campo elétrico? É alguma coisa real, ou é meramente o nome de um fator numa equação o qual deve ser multiplicado por alguma outra coisa para dar o valor numérico da força que medimos numa experiência? Duas observações podem ser úteis aqui. Primeira: desde que funciona, não faz diferença. Esta não é uma resposta frívola, mas séria. Segunda: o fato de que o vetor campo elétrico num ponto do espaço é tudo o que precisamos conhecer para calcular a força em *qualquer* carga naquele ponto não é, de modo algum, trivial. Poderia ser de outra forma! (PURCELL, 1970, p.17).

Desse modo, nosso modelo teórico não explicitamente apresenta uma discussão relativa ao conceito de “campo”, uma vez que pensamos: mesmo com as suas mais variadas interpretações, ao serem aplicadas no contexto de práticas sociais⁵⁵ que envolvam o eletromagnetismo, o conceito de “campo” é “diluído” e pode ser trabalhado com uma manipulação dos conceitos TCU.

Portanto, resumimos o questionamento “por que *campo* não aparece no quadro 1?” respondendo: de um ponto de vista concreto, aquilo que se queira falar sobre *campo*, também pode ser falado por um arranjo apropriado de

⁵⁵Adotamos o conceito de “prática social” a partir da teoria histórico-cultural, como apresentado em Saviani (1998), de sentido análogo à “*societal practice*” ou “*social situation of development*”, ou ainda “*practical problems*” presente em Chaiklin (2002), Hedegaard e Chaiklin (2005), e Davydov (1998, p. 43), respectivamente.

movimento, variação e interação. De um ponto de vista abstrato, o que é campo, senão as suas relações?

4.4.2. Lei de Gauss

A lei de Gauss pode ser enunciada como “o fluxo elétrico total através de qualquer superfície fechada é igual à carga elétrica total (líquida) existente no interior da superfície dividida por ϵ_0 ” (YOUNG; FREEDMAN, 2009, p. 49). Aqui, relaciona-se o campo elétrico à sua fonte a partir do conceito de fluxo. Como consequência, tem-se que cargas elétricas servem como sorvedouros de campo elétrico, e este é um dado fundamental da natureza – pelo menos de como a Física concebe a natureza hoje.

Com o nosso conhecimento atual do mundo físico, simplesmente entende-se que as cargas elétricas criam campo elétrico como um fato, ou melhor, como um consenso científico. Contudo, há debates sobre isso. Físicos com posições antirrealistas rebateriam algo do tipo: “como sabes que existe um campo elétrico *antes* de se colocar uma carga de prova para observar os efeitos do campo elétrico [e então afirmar sua existência]?”. Nessa dissertação adotamos uma posição que se encontra entre a “realista ingênua” e a antirrealista, algo como um “realismo dialético”: partimos do pressuposto que fenômenos apresentam relações essenciais que os governam, ao mesmo tempo que reconhecemos que essas relações são moldadas pelo sujeito cognoscente.

Desse modo, as propriedades do campo elétrico – sentido, direção, simetria e superposição – podem ser atribuídos por argumentos lógicos a partir da propriedade da carga elétrica⁵⁶, de tal modo que “a lei de Gauss não constitui *mais uma* lei física das interações eletrostáticas, mas é equivalente à lei de Coulomb” (SALÉM, 1986, p.86).

Contudo, Salém (1986) nos mostra que há pelo menos 4 diferentes interpretações da eletrostática. A concepção na qual a carga elétrica tem a capacidade de criar um campo elétrico – quanto sentir o campo elétrico criado por outras – é apenas uma escolha ontológica particular. Nessa escolha, outros

⁵⁶A dependência da intensidade do campo elétrico com o fator $\frac{1}{distância^2}$ está relacionada ao fato de que o espaço vazio não absorve e nem cria o campo elétrico (SALÉM, 1986, p.88) e desse modo não é um dado que provém logicamente da propriedade da carga elétrica.

conceitos-chaves como força elétrica, potencial eletrostático e energia potencial eletrostática são derivados formalmente do conceito de campo elétrico.

Por outro lado, também se tem a visão de mundo no qual a força elétrica é o elemento central, de existência própria, e a partir do qual se estruturam os outros conceitos. Nesta segunda interpretação, o campo elétrico não tem significado ontológico, sendo apenas um recurso algébrico, e a eletrostática é então descrita através da interação direta, à distância, entre as cargas – interpretação adotada por Ampère, Weber e outros.

As outras duas interpretações são aquelas que privilegiam i) o potencial elétrico ou ii) a energia potencial como elemento central e tendo os outros conceitos como derivados destes.

Do ponto de vista do magnetismo temos que: enquanto de um lado observamos a existência de cargas elétricas, ou monopolos elétricos; por outro lado, não existem cargas magnéticas, ou monopolos magnéticos. Para alguns físicos, esta constatação é uma “estranha” assimetria na física, nas leis de Maxwell em particular. Embora Pierre Curie (1859 – 1906) no final do século XIX tenha sugerido a existência de monopolos magnéticos, a temática ganharia força com Paul Dirac (1902 – 1984) na década de 1930 (MILTON, 2006, p.1639). Buscas por evidências experimentais do monopolo magnético têm sido relatadas há pelo menos quatro décadas. Investigações a esse respeito estão além do escopo do eletromagnetismo clássico uma vez que analisam sistemas quânticos. Contudo, vale a pena dizer que no âmbito teórico, as modernas teorias físicas que almejam uma unificação das interações fortes, fracas e eletromagnéticas preveem a existência de monopolos magnéticos (MACHADO, 2002, p.161). No âmbito experimental, com detectores supercondutores, o experimento de Cabrera (1982) relatou uma possível detecção de um monopolo magnético. No entanto, investigações posteriores que tentaram reproduzir esse experimento não tiveram o mesmo sucesso (MACHADO, 2002, p.160).

Em suma, acreditamos que independente da visão de mundo que sirva como base para a construção da teoria do eletromagnetismo clássico, se ela – a teoria – prevê e confirma resultados experimentais, então ela deve apresentar em seus conceitos, pelo menos, relações que envolvam “movimento”, “variação” e “interação”. O resultado previsto pela lei de Gauss –

tanto para a eletrostática quanto para o magnetismo – pode ser postulado à parte.

Desse modo encerramos a nossa discussão acerca do principal objetivo dessa dissertação: construir um modelo para o ensino de eletromagnetismo clássico a partir da noção de conceitos TCU descritos por Davydov. No próximo capítulo faremos uma breve apresentação de um exemplo que circunda práticas sociais modernas: o uso da energia elétrica.

Resumindo (...e Comentando...)

Nomeamos esse momento que encerrará o capítulo como “Resumindo (...e Comentando...)” em referência à Saviani (1998, p. 34) para organizarmos nossos principais pontos e esclarecer aspectos que podem ter ficados subjacentes no que concerne a elaboração e a funcionalidade do modelo teórico.

1) O *modelo teórico* que consiste nos 3 conceitos TCU é a *eletromagnetividade* no qual nos referimos na seção 1.3 onde explicitamos o problema de pesquisa. Acontece que não é *útil* se referir à *eletromagnetividade* em situações concretas de ensino de modo geral, sendo este apenas um termo que nos ajudou a fazer uma analogia com o exemplo da *passaridade*, exemplo mais próximo do nosso cotidiano, para *apresentar o nosso problema*. Dizer que o modelo teórico expressa a *eletromagnetividade* não significa muita coisa para o interlocutor, é mais significativo nos referirmos à *eletromagnetividade* pelos conceitos TCU de *movimento*, *variação* e *interação*, assim que eles forem apresentados. Desse modo, gradativamente deixamos de nos referir a *eletromagnetividade* ao longo do texto, porém ela sempre esteve presente quando fomos nos apropriando dos conceitos TCU.

2) Por que separar os conceitos TCU em *movimento* e *variação*?

Primeiro, a língua portuguesa, nas práticas cotidianas e nos textos de Física, já apresenta dois termos para se referir e identificar essas ações⁵⁷, que no caso são *movimento* e *variação*. Depois, como vimos ao explicar a lei de Faraday, a **corrente induzida em um circuito próximo depende da *variação* da**

⁵⁷ Como sugestão inicial: pense em *velocidade*. Em português usamos o termo de *velocidade* para expressar tanto o seu valor (módulo) quanto a direção e sentido. Por outro lado, na língua inglesa temos dois termos *speed* e *velocity*, no qual *speed* é o módulo (ou seja, um escalar) e *velocity* é uma quantidade vetorial, representando a direção e sentido. Assim, um modelo teórico de ensino de mecânica que envolvesse a noção de “*velocidade*” talvez fosse expresso com um ou dois termos, a depender do idioma.

corrente indutora, e não do seu movimento constante. Noutras palavras, o eletromagnetismo clássico compreende corrente elétrica como um fluxo ordenado de elétrons. Como sabemos, *fluxo ordenado de elétrons* pode ser constante, isto é, uma determinada quantidade de carga que atravessa uma seção transversal de um condutor durante um determinado intervalo de tempo pode ser um escalar (lembre-se da definição de corrente elétrica: $i = \frac{dQ}{dt}$). O que estamos tentando sugerir é que a **noção de corrente elétrica já é construída a partir de uma noção de movimento**. Contudo, para termos o efeito da indução eletromagnética, precisamos que a corrente – que já é um movimento – **varie** com o tempo.

Podemos olhar a lei de Ampère: $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$. Os termos μ_0 e ϵ_0 são constantes relacionadas ao meio e não atrapalham a análise a seguir: o primeiro termo ($\mu_0 \vec{J}$) representa a corrente de condução, o segundo termo ($\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$) representa a **variação da densidade de carga** no tempo. Perceba que nessa única equação temos tanto a noção de *movimento* (expressa por $\vec{J}$) quanto de *variação* ($\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$). No caso de um **deslocamento constante** de cargas em determinada região do espaço, este último termo seria nulo. Por outro lado, se o **deslocamento não for constante** (ou seja, um *movimento que varia não constantemente*) então este termo é não nulo. Desse modo, a lei de Ampère mostra que: campos magnéticos são formados **tanto** por correntes elétricas (*movimento*) **quanto** pela *variação* da densidade de cargas (isto é, do campo elétrico).

De certo que um modelo teórico **pode** ser apresentado com apenas *movimento* e *interação*, caso a noção de *movimento* seja **ampliada** a fim de embarcar a noção de *variação* que apresentamos. A questão que propomos é se ampliar a noção de *movimento* para englobar *variação* é **realmente mais útil**, uma vez que as leis de Ampère e de Faraday já distinguem esses dois conceitos, por exemplo.

3) Elaboramos um modelo teórico para o ensino de eletromagnetismo, o que é essencialmente diferente de um modelo teórico para o eletromagnetismo. Note que não apenas no título dessa dissertação, mas em todo o trabalho nos referimos à construção de um modelo teórico para o *ensino de eletromagnetismo* e esta ênfase não foi por acaso.

Pode-se questionar: **eles não deveriam ser iguais?** A este questionamento, respondemos: *como poderiam?* O conjunto que compreende o objeto de investigação, de análise, as atividades que os sustentam e as expectativas se diferem entre o ensino de eletromagnetismo e o eletromagnetismo enquanto ciência física. Explicamos:

Olhando-se para os agentes: não somos físicos profissionais, o que significa que nossos interesses e motivos de atividade e de pesquisa estão relacionados à formação de professores e não à criação ou aperfeiçoamento de métodos experimentais, teóricos ou computacionais que envolvem o eletromagnetismo enquanto ramo *per si* da ciência. Nesse sentido, não dotamos de equiparado conhecimento teórico e empírico sobre a física do eletromagnetismo tal como seus profissionais. Seria interessante ver pesquisas que investigam como o conhecimento e apropriação da essência e da aparência diferem entre físicos profissionais e educadores em física em diferentes contextos de produção de conhecimento acerca do eletromagnetismo e do seu ensino, por exemplo. Não descartamos a possibilidade que um *modelo teórico do eletromagnetismo* classifique como relações essenciais a propriedade de *spin*, conservação da carga elétrica e sua existência *a priori*, por exemplo. Por outro lado, e o que precisa ficar claro: não acreditamos que os físicos profissionais, que trabalham e constroem diferentes significados do eletromagnetismo em suas atividades cotidianas, ***discordariam dos conceitos TCU por nós apresentados!*** O que aconteça, talvez, seja que os conceitos TCU conforme apresentado e justificado por nós, ainda não sejam suficientes para enquadrar uma *eletromagneticidade* do ponto de vista dos físicos profissionais. **Mas isso não é o aspecto mais relevante.**

O aspecto mais importante é a atividade: o modelo aqui construído foi idealizado a partir da teoria do ensino desenvolvimental, que como vimos está interessada numa organização específica de pensamento e conhecimento de um objeto, evento ou fenômeno. Portanto, nosso modelo teórico é principalmente destinado ao entendimento e explicação de eventos e situações concretas de vida dos escolares (HEDEGAARD; CHAIKLIN, 2005). A idealização de um modelo teórico feito por físicos profissionais para outros físicos profissionais e aplicação em seus respectivos contextos é, **de partida**, diferente do nosso; portanto, espera-se que os conceitos TCU também sejam diferentes em certo sentido.

Desse modo, estamos mais preocupados se o modelo aqui preconizado é capaz de auxiliar em problemas que afetam diretamente a realidade dos alunos em suas atividades humanas e como seres sociais de uma comunidade. Portanto, não sugerimos que o nosso modelo teórico seja “testado” a partir de questões do tipo: *com a suposição de uma carga elétrica positiva Q_1 no plano cartesiano no ponto $A(2,5)$ e uma carga elétrica negativa Q_2 no ponto $B(-4,11)$, determine a intensidade da interação elétrica entre elas; e considere uma partícula de carga elétrica $q = 1,6 \times 10^{-19}C$, com massa $m = 1,67 \times 10^{-27}kg$ que se desloca em um campo magnético $\vec{B} = (0,152T)\hat{i} + (0,500T)\hat{j} - (0,225T)\hat{k}$. Qual o nome da partícula? E se em $t = 0$, a partícula possui $v_x = 1,5 \times 10^5 m/s$, $v_y = 0$, $v_z = 2,0 \times 10^5 m/s$, determine o módulo, a direção e o sentido da força que atua sobre ela. Ou ainda: mostre que o potencial vetor magnético produzido por dois fios infinitos pelos quais passam correntes de mesmo valor i de sentidos opostos é dado por $\vec{A} = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \hat{n} \ln \frac{r_2}{r_1}$, onde r_1 e r_2 são as distâncias dos fios até o ponto considerado e $\hat{n}$ é um vetor unitário paralelo aos fios (MACHADO, 2002, p. 410). Se o objetivo da atividade de ensino de eletromagnetismo seja a resposta dessas perguntas, sugerimos que usem outros modelos mais apropriados.*

Estamos interessados em questões relacionadas com atividades concretas socialmente úteis (DAVYDOV, 1998b; HEDEGAARD; CHAIKLIN, 2005) que consideramos como, por exemplo: *por que tenho energia elétrica em casa? Como posso esquentar a minha comida?* Discussões pertinentes a estas duas últimas questões, que ilustram um exemplo para a compreensão do modelo teórico, são apresentadas no próximo capítulo.

4) Aproveitando o gancho do item anterior: em diversos momentos durante a elaboração do modelo teórico, tivemos a oportunidade de conversar com amigos e professores que realizam pesquisa básica em Física. Após a apresentação das relações do modelo, surgia com frequência o questionamento: **mas e a carga elétrica?**

A esse questionamento, perguntávamos: *o que sobre a carga elétrica?* As respostas geralmente eram “a capacidade de criar campo elétrico” ou semelhantes. Certo, e o que temos sobre o campo elétrico? E agora voltamos à discussão apresentada na seção 4.4.1., onde sugerimos que a utilidade prática de *campo* é se ele serve como *um meio de interação*. Como o modelo teórico

expressa as relações fundamentais, temos que esta deveria ser *interação*, e não *campo* ou *carga elétrica*.

Note, contudo, que o “*nível de relevância*” do conceito – no caso a *carga elétrica* – **é totalmente dependente da atividade de ensino** em questão. Por exemplo, em uma atividade no qual o foco seja o uso da história e da filosofia da ciência para discussão sobre a existência ontológica da *carga elétrica* num espaço vazio, distante de tudo e de todos, o conceito carga elétrica é relevante e *central*. Ou ainda, uma atividade sobre a função que a *carga elétrica* teve em diferentes modelos atômicos, de John Dalton a Niels Bohr, por exemplo, e como este conceito alterou conforme alteravam-se técnicas experimentais.

5) De certa forma, o trabalho para elaboração do modelo teórico consiste na seleção e explicação das relações que não são tão abrangentes, nem tão específicas. Mas sim aquelas que são *abrangentes o suficiente*. Embora seja vaga essa resposta, somos capazes de compreendê-la com exemplos: pensamos que todos nós concordaríamos que relações entre o *tempo* e o *espaço*, ou a *existência do universo tridimensional*, ou a relação entre a *matéria do universo com a sua expansão*, ou a axiomatização lógica formal que sustentam nossos símbolos como $<$, $=$, $>$, etc são **gerais demais**. Tais relações não nos parecem ajudar a compreensão e possibilidade de atuação em situações concretas da vida do estudante, que funciona como uma “ponte” (CHAIKLIN, 1999, p. 208) entre os interesses do ensino e do desenvolvimento intelectual. Por outro lado, a relação entre R^2 e $\frac{4L}{C}$ em um circuito elétrico é **específica demais**. Será que não há relações “*mais centrais*” que estas, uma vez que consideramos o ensino de eletromagnetismo visando o desenvolvimento intelectual dos estudantes?

Chaiklin (1999, p. 196) comenta a existência de poucos trabalhos, principalmente destinados a temas do ensino médio (“*upper-secondary education*”), que se proponham à elaboração de um modelo teórico. Assim, é difícil oferecer uma visão definitiva sobre como o processo de investigação deve proceder. *No entanto, sentimos a necessidade de esclarecer mais alguns pontos relativos ao processo.*

Conforme já exposto, temos de partida o entendimento que os conceitos são formados histórica e culturalmente, e existem objetivamente nas formas das atividades humanas que os sustentam (DAVYDOV, 1988a). Desse modo, se queremos compreender a essência de um conceito nos moldes da teoria do

ensino desenvolvimental, não podemos abrir mão de uma investigação *lógico-histórica*.

Do ponto de vista lógico, temos que *alguns conceitos científicos apareciam com mais frequência em propostas didáticas ou apresentavam mais relações nos mapas conceituais*. Estes são os conceitos que se referem a *carga elétrica, campo eletromagnético, força elétrica, potencial elétrico, corrente elétrica, indução eletromagnética e ondas eletromagnéticas*. Como vimos, estes são conceitos de *origem científica*, mas não necessariamente são os conceitos TCU; afinal, *conceitos TCU são as relações básicas*.

Faça esse exercício: pronuncie: “*conceito de campo elétrico*”; agora diga “*relação de campo elétrico*”. A primeira construção soa razoavelmente normal, nada demais. Mas a segunda, “*relação de campo elétrico*” soa estranho, não? Por quê? Soa estranho pois “*campo elétrico*” ou é um conceito *a priori* (e portanto não é construído sob nenhuma relação) ou é construído sob diversas relações (e portanto não é exatamente o que buscamos, visto que buscamos àquelas relações básicas; noutras palavras, as relações que sustentam o conceito de campo elétrico nas atividades sociais dos estudantes). Nisto, fomos movidos pelos “soares estranhos” destes conceitos de origem científica, que vemos tanto nos manuais didáticos quanto nos artigos, e constantemente nos perguntávamos: *quais são as relações que sustentam estes conceitos, que permitem a sua existência e lhe atribuem sentidos?*

Com isso, selecionamos os conceitos para os quais olharíamos o **desenvolvimento histórico**. Noutras palavras, como “campo eletromagnético” de outrora passou a ser o *campo eletromagnético* descrito pelos manuais didáticos de hoje? O conceito de *elétron* como partícula de carga elétrica só surgiu no final do século XIX, então como os físicos se referiam a *ideia* de elétron antes desse período? E se o desenvolvimento do eletromagnetismo fez com que *elétron* surgisse *no final* do século XIX, como que os físicos se referiam a corrente elétrica, *no início* deste mesmo século, por exemplo?

É evidente que o nível de precisão e detalhe para cada uma dessas perguntas configura uma dissertação própria. Mas ainda sim é possível desenvolver consciência o suficiente desse processo a fim de elaborar uma sugestão de modelo teórico para o ensino de eletromagnetismo (certamente

dizemos isso agora, uma vez que durante o processo nós não tínhamos referência)⁵⁸.

Os principais resultados da análise do desenvolvimento histórico do eletromagnetismo foram apresentados nas seções 4.1, 4.2 e 4.3. Dos relatos históricos, mostramos que mesmo que o “*agente*” tenha sido chamado e interpretado por diversos nomes e significados (“alma, virtude, chhi, fluido, fluídos, vórtices, éter, partículas”), eles parecem ser *construídos sob as mesmas relações*.

Neste sentido, por exemplo, descreve-se o *movimento* de uma agulha imantada quando há a *passagem* de uma corrente elétrica. A noção de *corrente elétrica* já foi interpretada como um *único fluido*, ou *fluídos invisíveis*, ou *interação entre íons*, ou *partículas invisíveis* até chegar ao conceito moderno de *fluxo de elétrons*. Embora os “*agentes*” mudassem por conta da linguagem utilizada por um mesmo físico – como alertado por Bezerra (2006) – ou entre diferentes físicos – como Faraday havia notado (DARRIGOL, 2000) – o apelo à ideia de “*movimento* de algo” ou “*passagem* de algo” estava presente nos diferentes discursos, de diferentes personagens ao longo da construção histórica do conceito de *corrente elétrica*. O mesmo é dito em relação à noção da *interação*, conforme apresentado na seção 4.3.3.

O que precisa ficar claro deste item é: não somos capazes de sugerir uma metodologia de investigação, no sentido de uma receita de bolo para analisar quais podem ser os *conceitos TCU* de qualquer conteúdo. O que fizemos foi mentalmente “confrontar” aquelas relações que pareciam ser centrais com o problema “*como eu tenho energia elétrica em casa?*” *durante todo o processo investigativo*. Lembramos que as relações (os conceitos TCU) não são abstrações formais, que servem para todos os conteúdos e contextos, o que dá o gancho para o próximo e último item.

6) Se tanto a elaboração quanto o uso do modelo teórico dependem do contexto das atividades de ensino no qual é destinado e está inserido,

⁵⁸ Chaiklin (1999, p. 193-194, tradução nossa) relata que na tentativa de construir um modelo teórico para o ensino de física atômica (“*atomic physics*”) para o ensino médio, foram necessários 4 meses de encontros semanais com um professor universitário de física, e diversos professores de física do ensino médio, sendo todos estes possuidores de diploma universitário em física. Mesmo assim, segundo Chaiklin, “nós não conseguimos formular o que poderia ser chamado de modelo teórico para a física atômica”. Em nosso caso, o processo de leitura do material e elaboração do modelo teórico levou por volta de 10 meses de trabalho quase diário. Outros trabalhos como Borges (2016) e Marengão (2011) não detalham o processo para seleção dos conceitos teóricos que apresentam nem dão uma referência temporal.

qual é a real contribuição do modelo teórico aqui apresentado...ainda mais que ele não foi construído em nenhum contexto concreto de atividade de ensino? E a *eletromagneticidade* não deveria ser *universal*? O que de fato está acontecendo? Esses questionamentos estão no cerne do problema dessa dissertação, e sugerimos o seguinte raciocínio: de fato, diferentes contextos de ensino de eletromagnetismo apresentam diferentes necessidades e realidades concretas. Contudo, lembramos – e isso é um ponto chave na teoria do ensino desenvolvimental – se as atividades de ensino de eletromagnetismo possuírem o foco no desenvolvimento do *pensamento teórico* dos estudantes, então as organizações destas atividades deverão estar vinculadas aos *conceitos TCU*.

Segundo Davydov (1990) o **pensamento teórico é realizado em duas formas básicas: i)** é feita uma generalização teórica, a partir da lógica que estrutura conteúdo, na qual estabelece a essência do objeto em questão. Noutras palavras, a generalização teórica é expressa na forma dos conceitos TCU, da *eletromagneticidade*. Analisa-se dados reais relacionados à lógica do conteúdo do eletromagnetismo (por exemplo, para acender um LED precisamos de uma corrente elétrica, que por sua vez precisa de uma diferença de potencial ou da variação de um campo magnético etc) e, *tendo em mente o problema social da obtenção de energia elétrica* (quais relações que estão presentes para acender o LED são centrais para compreender, por exemplo, o problema da geração e consumo de energia elétrica numa residência da capital de São Paulo?) fomos capazes de delinear um modelo teórico para o ensino de eletromagnetismo. **Foi isso que principalmente fizemos nessa dissertação.**

Mas o pensamento teórico não acabou! A segunda forma básica **ii)** se dá na exposição das contradições dos conceitos TCU e uma determinação para sua aplicabilidade em casos concretos. Nesse momento, há a ascensão da essência abstrata (as relações *movimento*, *variação*, *interação*) para unidades concretas: o *movimento* de queda d'água em uma hidrelétrica para *movimentar* um rotor que permite a *variação* do campo magnético, o *movimento* de elétrons em cabos condutores a quilômetros de distância até as casas, no qual se tem um microondas que permite uma *interação* entre o campo eletromagnético e a matéria, permitindo a *variação* da temperatura do prato de comida no microondas. Esse processo é discutido em detalhes no próximo capítulo.

Note que a *essência* (relativa às ideias de *movimento*, *variação* e *interação*) se mantém, o que difere são as formas que esta essência “*ganha vida*”. São estas formas que a essência ganha vida (no jargão, *ascender ao concreto*) que diferem conforme os contextos sociais e culturais que cada escola, aluno e professor experiencia. Não temos uma linguagem dinâmica da qual podemos usar para expressar que este processo do pensamento teórico é um contínuo, não existe “meio pensamento teórico”, no qual se encerraria até a elaboração do modelo teórico. Lembramos de Ilyenkov (2007) que não há um “pensar puro”, no sentido que todo pensamento é em relação a um objeto. Nosso objeto não foi uma realidade concreta escolar ou de atividade de ensino. O nosso objeto de investigação foram os dados reais que organizam a lógica do conteúdo a partir de um problema social hipotético “como tenho energia elétrica em casa?”.

Portanto, em certo julgamento, o modelo teórico ora apresentado não faz sentido sozinho. Estendendo esse julgamento, essa própria dissertação só faz sentido quando os conceitos TCU forem postos “a prova” às diferentes realidades concretas de ensino de eletromagnetismo. Nesses momentos os conceitos TCU ganharão significados. Significados que dependem dos sujeitos, dos alunos, do professor, da mediação entre estes, da atividade de ensino e do contexto no qual estão inseridos.

Ora, então estamos falando que a dissertação não faz sentido? Não, estamos falando que o sentido dessa dissertação (do modelo teórico apresentado) enquadra uma possível representação **inicial** de uma organização das relações centrais que visa o ensino de eletromagnetismo, fundamentado na teoria do ensino desenvolvimental. O modelo teórico oferece uma maneira de organizar as relações conceituais que inundam cada uma das áreas, em especial do ensino de eletromagnetismo, e, além disso, oferece uma sugestão de como conceitualizar as diferentes atividades de ensino (CHAIKLIN, 1999).

Desconhecemos uma organização semelhante na literatura, e a sua necessidade foi relatada nos capítulos 1 e 2 desta dissertação: **precisamos trabalhar com as relações essenciais para desenvolver o pensamento teórico; ótimo, mas quais podem ser essas relações se consideramos o ensino de eletromagnetismo?** O próximo passo, *que idealmente deveria ocorrer simultaneamente*, é: como essas relações se concretizam em

diferentes contextos e atividades de ensino? As formas de concretização necessariamente vão modificar o modelo teórico inicial, expandindo-o e atribuindo-lhe significados.

Elaboramos o quadro 2 a seguir no intuito de mostrar que, embora haja diferentes processos dos quais a teoria do ensino desenvolvimental se refere, estes *processos fazem parte de um todo conectado, dialeticamente influenciado*.

Quadro 2. Ilustração da dinâmica entre a generalização abstrata da lógica do conteúdo, do modelo teórico e sua concretização em diferentes contextos. Todo processo, representado pelas 4 setas, é mediado pelo pensamento teórico e pelo modelo teórico na teoria do ensino desenvolvimental.

Chaiklin (1999) resume o processo ilustrado no quadro 2 em termos como:

uma típica recomendação é começar com as relações básicas, investigar algumas variações dessas relações, tentar uma síntese via o modelo que captura os aspectos essenciais, aplicar o modelo para novos e casos relacionados e então avaliar a adequação do modelo teórico (CHAIKLIN, 1999, p. 191, tradução nossa).

Chamamos atenção para esse trecho de Chaiklin (1999, p. 191) no qual é dito “*começar com as relações básicas*”. Delimitar e justificar quais poderiam ser, e principalmente quais não poderiam ser essas relações básicas (o que fizemos nessa dissertação) é apenas o primeiro passo de um longo processo.

Ao fim e ao cabo, a última palavra sobre a adequação do modelo teórico é do professor com seus alunos, pois ele é o único que conhece seus contextos e suas realidades materiais concretas. O que sugerimos é que o

professor estruture as atividades de ensino estando consciente dos *conceitos TCU*, e permita que os estudantes descubram e investiguem as relações e as manifestações dessas leis gerais que formam a eletromagneticidade em diferentes exemplos concretos (HEDEGAARD, 1996; HEDEGAARD, 2002).

Este é o caminho pelo qual a teoria do ensino desenvolvimental aponta uma chance maior do desenvolvimento da personalidade intelectual, em particular, do pensamento e conhecimento teórico. Isto pois, a apropriação do conteúdo e o desenvolvimento intelectual se dá em um processo indissociável, simultâneo, que se transformam e se expandem mutuamente.

5. Pensando o modelo teórico: como tenho energia elétrica em casa?

O tema *energia elétrica* é bastante explorado na literatura a partir do enfoque Ciência-Tecnologia-Sociedade (CTS) (MACIEL, 2010; SILVA e SANTOS, 2014; CAMPOS, 2017; CAVALCANTI; RIBEIRO; BARRO, 2018). Isto é, estuda-se a energia elétrica para além dos seus processos físicos. Há preocupação em explicitar as relações com o meio ambiente, impactos positivos e negativos que a implementação das mais diferentes formas de produzir energia elétrica causam à população e à biodiversidade. Segundo Campos (2017) no enfoque CTS

a prioridade não é dada para o entendimento dos aspectos científicos e tecnológicos, mas sim para a compreensão dos aspectos sociais, ambientais, políticos, econômicos, históricos, éticos e culturais atrelados aos temas científicos e tecnológicos. Desta forma, a compreensão dos fenômenos e conceitos científicos envolvidos no tema se torna apenas uma condição para que os demais aspectos sejam compreendidos efetivamente (CAMPOS, 2017, p. 73).

Essa visão teórico-metodológica apresenta semelhanças e intersecções com a preocupação de pautar ensino de ciências em aspectos referentes às práticas sociais, conforme descrito e apresentado por Hedegaard e Chaiklin (2005).

Contudo, nosso objetivo com esse capítulo é apenas mostrar algumas possibilidades que o modelo teórico construído no capítulo anterior apresenta para o entendimento de alguns fenômenos eletromagnéticos que circundam o tema da energia elétrica.

5.1. Energia elétrica na cidade de São Paulo

Muitas etapas precisam acontecer para que um morador da cidade de São Paulo consiga esquentar sua comida no forno de microondas. As principais etapas nesse amplo contexto da energia elétrica são geralmente divididas em geração, transmissão e distribuição (CAMPOS, 2017). A figura 1 ilustra essa segmentação⁵⁹.

Figura 1. Visão geral de um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Fonte: Blume (2016, p.3).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica, o Estado de São Paulo apresenta 48 diferentes Usinas Hidrelétricas. Sendo as hidrelétricas responsáveis por mais da metade da produção de energia elétrica em São Paulo, optamos por utilizá-la como exemplo⁶⁰. Embora os detalhes da produção de energia elétrica variem dependendo do tipo de usina, todas tem por finalidade a produção de energia elétrica através do aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio (TORRES, 2013).

A estrutura de uma usina hidrelétrica é formada principalmente pelo sistema de captação e adução de água, pela barragem e pela casa de força e vertedouro (QUEIROZ et al., 2013). Estamos particularmente interessados na casa de força, local responsável pela conversão tanto da energia hidráulica da queda d'água em energia mecânica (CARVALHO, 2011) e posteriormente em energia elétrica (VERGÍLIO, 2012). Simplificadamente, dentro da casa de força

⁵⁹ Evidentemente cada uma dessas etapas é objeto de estudos específicos para cada região, da companhia elétrica, das normas e técnicas impostas por agências reguladoras, entre outros. Vamos apenas apresentar uma visão geral desse processo, destacando a geração de energia elétrica.

⁶⁰ Mesmo no contexto nacional as hidrelétricas se destacam como fonte energética. Existem no Brasil pelo menos 900 usinas hidrelétricas em funcionamento, o que corresponde a aproximadamente 80% da oferta total de energia do país (CAMPOS, 2017, p. 27).

encontra-se uma – ou mais – turbina que está acoplada a um gerador elétrico⁶¹ que funciona pelo princípio da indução eletromagnética.

No contexto da geração de energia por uma hidrelétrica para sua distribuição, é economicamente mais vantajoso à produção de corrente alternada⁶². Correntes alternadas são produzidas por geradores elétricos alimentados por uma fonte de tensão alternada semelhantes ao da figura 2 abaixo.

Figura 2. Esquema simplificado de um gerador elétrico de corrente alternada.

Fonte: Machado (2006, p.978).

Essa figura apresenta mais detalhes do que precisamos para a discussão. O importante é observarmos que: uma bobina formada por N espiras de área A é colocada em **movimento** através de um rotor. Com isso, há **variação** do fluxo magnético – produzido pelos ímãs – que passa através da bobina, que por sua vez está conectada em um circuito que possui ao seu final um transformador⁶³. A velocidade angular de rotação do rotor é padronizada e ajustada para obter frequência de 60 hertz⁶⁴.

⁶¹Os geradores elétricos para centrais hidrelétricas, em princípio, podem ser síncronos ou assíncronos (LIMA, 2002, p. 3-6), mas seus detalhes técnicos são dispensáveis para nós, visto que ambos funcionam segundo o mesmo princípio da indução eletromagnética.

⁶²Young e Freedman (2009, p. 365) explicam “para transmitir energia elétrica através de distâncias muito grandes, é desejável o uso de uma tensão mais elevada possível e de uma corrente muito pequena; isso faz diminuir as perdas proporcionais a Ri^2 (R representa resistência e i a corrente elétrica) que ocorrem nas linhas de transmissão, e fios mais finos podem ser usados, economizando materiais”. Lembremos que Energia = Tensão x Corrente, assim se queremos transmitir uma quantidade de energia, temos apenas que nos preocupar com o produto da tensão pela corrente (BLUME, 2016, p.49). A escolha por corrente alternada – ao invés de corrente contínua – está ligado a aspectos técnicos para a produção de altas tensões.

⁶³A função desse equipamento é aumentar – ou diminuir – a tensão proveniente de uma fonte de corrente alternada. O mais importante é que ele – assim como o gerador – *também funciona a partir do conceito de variação*, seguindo especificidades da lei de Faraday (YOUNG; FREEDMAN, 2009, p. 365-367).

⁶⁴A velocidade de rotação depende da quantidade de polos (norte/sul) de um rotor. Por exemplo, o rotor da figura 2 teria que rodar a uma frequência angular $\omega = (2\pi \text{ rad})(60^{-1}) = 377 \text{ rad/s}$, ou 3600 rotações por minuto (rpm) para gerar uma frequência de 60 hertz. Há

Em geral, a produção de energia elétrica acontece afastada dos grandes centros urbanos. Com isso, a eletricidade gerada nas hidrelétricas percorrem longas distâncias em um complexo sistema de transmissão. A tensão nas linhas de transmissão é da ordem de centenas de quilovolts e alternam as suas polaridades 60 vezes a cada segundo⁶⁵. As linhas de transmissão são caracterizadas por sua capacidade de guiar a propagação da energia eletromagnética (WENTWORTH, 2009). Vamos simplificar o processo de transmissão tendo como foco o fenômeno físico relacionado à propagação de energia eletromagnética nos cabos condutores⁶⁶.

A transmissão de energia – tanto em meios em condutores quanto no vácuo – só é possível pois existe uma **interação** entre o campo elétrico e o campo magnético. Alguma interação entre os campos precisava existir uma vez que não é possível termos uma onda puramente elétrica que se propaga através do espaço, ou seja, uma onda composta apenas de um campo elétrico. Essa impossibilidade se deve ao fato que uma onda puramente elétrica teria um campo elétrico variante. Esse campo elétrico variante necessariamente gera um campo magnético⁶⁷, portanto uma onda puramente elétrica é impossível (YOUNG; FREEDMAN, 2009). O inverso também é verdadeiro: não há onda puramente magnética.

Assim, vemos que os campos elétricos e magnéticos **interagem** de alguma forma. Mas de qual forma? Nos cabos coaxiais presentes nas linhas de transmissão área, as ondas eletromagnéticas são senoidais e os campos interagem transversalmente, isto é, tanto o campo elétrico quanto o campo magnético são perpendiculares à direção de propagação da onda. Além disso, eles também são mutuamente perpendiculares, conforme ilustra a figura 3.

Figura 3. Representação de campos elétricos e magnéticos para uma onda eletromagnética senoidal.

rotores com 40 polos e estes giram a 180 rpm para produzir os mesmos 60 Hz (BLUME, 2016, p. 20).

⁶⁵Em diversos países, inclusive no Brasil, quase todos os sistemas de distribuição de energia elétrica usam a frequência de 60 Hz (YOUNG; FREEDMAN, 2009, p.347).

⁶⁶Há outros fenômenos eletromagnéticos que ocorrem em linhas de transmissão. A dissipação da energia em forma de radiação é um deles. Contudo, em baixas frequências esse fenômeno não é tão pronunciado e a perda de energia em forma de radiação pode ser desprezada (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 1977).

⁶⁷Podemos ver esse resultado ao explicitarmos a lei de Ampère: $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$. Ela demonstra que existem duas fontes de campo magnético: a corrente de condução representado por $\vec{j}$ no primeiro termo, e a variação do campo elétrico representado por $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$. Tanto μ_0 quanto ϵ_0 são constantes relacionadas ao vácuo, e não alteram nossa conclusão.

Fonte: Correra (2017).

Observando a figura 3, vemos que os planos que contém os vetores campo elétrico e magnético são transversais à direção de propagação. Essa onda é chamada de onda transversal eletromagnética (TEM), sendo também progressiva: à medida que elas avançam, transportam a densidade de energia⁶⁸ (YOUNG; FREEDMAN, 2009, p.391).

Com isso, temos que a rede de transmissão guia uma grande quantidade de energia elétrica através de longas distâncias, porém antes de ser distribuída aos consumidores finais, a energia ainda precisa passar por uma subestação conforme indicado pela figura 1. Nessa etapa novamente encontram-se os transformadores, mas diferentemente de aumentar a tensão, desta vez eles são utilizados para abaixar a tensão até uma faixa segura para uso industrial, comercial ou residencial (BLUME, 2016).

As linhas de transmissão ficam expostas às mais diversas influências externas do meio ambiente, como vento, chuva, neve, raios, vegetação, entre outras. Particularmente destacamos as **interferências** que ocorrem devido às atividades do Sol, também conhecidas por ventos solares⁶⁹. Como sabemos, a Terra apresenta um campo magnético, e a interação do vento solar com o campo magnético terrestre pode acarretar diversos fenômenos eletromagnéticos indesejados (KAPPENMAN; ALBERTSON; MOHAN, 1981).

Pela lei de Ampère, temos que associado à variação do campo magnético terrestre, teremos a presença de um campo elétrico (CAMPBELL, 1986) e pelos resultados de Faraday, surgirá uma corrente elétrica induzida na superfície terrestre e nas linhas de transmissão (PIRJOLA, 1985). Esse

⁶⁸O sentido e direção do fluxo de energia coincidem com o sentido e direção de propagação da onda, sendo descrito analiticamente pelo vetor de Poynting: $\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$, onde $\vec{E}$ e $\vec{B}$ são os vetores campo elétrico e campo magnético, respectivamente.

⁶⁹O vento solar é um fluxo de partículas ionizadas, predominantemente núcleos de hélio ionizados e elétrons (COSTA Jr. et al., 2011, p. 4303).

fenômeno conhecido por indução geomagnética terrestre foi responsável pela saturação de alguns transformadores nas subestações e pelos maiores “apagões” da história e outros fenômenos eletromagnéticos curiosos⁷⁰. Com isso, muito têm se investido em pesquisa e tecnologia para proteger os sistemas de gerações de energia elétrica, bem como as linhas de transmissão.

Ao final de todo esse processo, temos acesso à energia elétrica em casa. Com isso, somos capazes de ter iluminação elétrica e ligar na tomada os mais variados tipos de aparelhos elétricos. Um aparelho eletrodoméstico bastante utilizado é o forno de microondas.

Esse forno elétrico é capaz de produzir ondas eletromagnéticas na faixa de frequência entre 300 MHz e 300.000 MHz, e é composto principalmente por três componentes: *magnetron*⁷¹, guia de ondas e a cavidade (SOUZA; NOGUEIRA; RASSINI, 2002). Tanto o guia de ondas quanto a cavidade são compostos por paredes refletoras e são construídos com a função de direcionar as microondas produzidas no *magnetron* para a cavidade e evitar perdas de energia eletromagnética. O mais importante para a nossa discussão é entender de maneira geral como o alimento aquece quando submetido às microondas.

O aquecimento de uma amostra no microondas acontece, pois há uma **interação** entre as moléculas da amostra com o campo eletromagnético das microondas⁷². A absorção da radiação das microondas por íons dissolvidos e pelos solventes se deve principalmente a dois mecanismos: rotação de dipolos e migração iônica (SOUZA; NOGUEIRA; RASSINI, 2002).

⁷⁰Em março de 1989, uma grande ejeção de massa solar perturbou diversos sistemas de comunicação ao redor do mundo, com relatos da Austrália e Suécia. A província de Quebec, Canadá, ficou pelo menos 9 horas sem energia elétrica (ALLEN et al., 1989; KURTH, 1991). Contudo, o efeito mais impressionante de correntes induzidas devido a uma erupção solar aconteceu em setembro de 1859 que produziu anomalias – como o surgimento de aurora boreal em regiões afastadas do polo como Havaí – nos Estados Unidos e em todo continente europeu (MELONI; LANZEROTTI; GREGORI, 1983; BOTELER, 2006). O relato mais impressionante – sendo diversas vezes citado na literatura – foi feito por Prescott (1866, p. 319-324) e descreve que as linhas telegráficas funcionavam apenas devido à eletricidade das auroras boreais: “*aurora borealis produces remarkable effects upon the telegraph lines during its entire manifestation [e estações americanas usaram] of the auroral current for transmitting and receiving telegraphic despatches. [Entre Boston e Portland] it was suggested that the batteries should be cut off, and the wires simply connected with the Earth*”. Assim, durante algumas horas nesse evento de setembro de 1859, as linhas telegráficas na região de Boston funcionaram sem baterias, apenas com as correntes elétricas induzidas provenientes da ionosfera!

⁷¹O funcionamento do *magnetron* é semelhante ao funcionamento de um circuito constituído por uma bateria, capacitor e indutor (MAI, 2008).

⁷²Alimentos são aquecidos devido a interação do componente elétrico do campo eletromagnético com as moléculas do alimento. O componente do campo magnético aquece outros materiais como os metais. Por essa razão é que não se coloca recipientes metálicos no forno de microondas (SCHIFFMANN, 2010).

O mecanismo da **rotação** de dipolos faz referência à característica de que a molécula da água é polar. Ou seja, a molécula da água apresenta polo positivo e polo negativo, formando um dipolo elétrico. Assim, elas são capazes de se alinhar com o campo elétrico externo das microondas. Como retratado na figura 3, vemos que o campo elétrico **varia** com o tempo, mudando de sentido de oscilação. Nesse processo, as moléculas polares que compõe o alimento tendem a se alinhar com o campo incidente. Essa constante tentativa de se alinhar com o campo elétrico incidente resulta no aumento da energia cinética das moléculas e, conseqüentemente, no aumento da temperatura do alimento⁷³. A figura 4 ilustra esse processo.

Figura 4. Representação ilustrada do processo de rotação de dipolos devido à interação de um campo elétrico incidente e a molécula de água.

Fonte: Mai (2008).

Os alimentos também possuem outras substâncias além da água. Uma dessas substâncias é o sal, que é um composto iônico. Assim, a migração iônica consiste no movimento dos íons dentro da amostra devido à rápida variação do campo elétrico das microondas. O **movimento** de deslocamento dos íons sofre resistência causada por outras espécies iônicas o que resulta no aumento da energia cinética e conseqüentemente da temperatura do alimento (MAI, 2008; SCHIFFMANN, 2010).

Portanto, o que tentamos apresentar com essa discussão foi: dado um fenômeno ou prática social que envolva o eletromagnetismo, este poder ser essencialmente compreendido a partir da manipulação dos conceitos TCU.

⁷³Lembremos que a frequência de um forno de microondas doméstico é da ordem de 10^9 Hz. Ou seja, esse ciclo de alinhamento e desalinhamento da molécula com o campo externo ocorre bilhões de vezes a cada segundo.

5.2. Considerações do exemplo da geração e uso de energia elétrica

Discutimos, no capítulo 4, que o estudo de fenômenos eletromagnéticos em geral pode ser reduzido a relações dos conceitos TCU: *movimento*, *variação* e *interação*. Na seção 5.1. apresentamos um caso particular que se refere desde a produção de energia elétrica até a sua utilização pelo consumidor final.

As relações que envolvem os conceitos TCU direcionam a atenção para o estudo do eletromagnetismo conforme o interesse escolhido pelo professor em consonância com os interesses dos alunos e da sociedade. Enfatizamos que o ensino escolar ao enfatizar a criação, manipulação, e aplicação dos conceitos TCU, determinados segundo a teoria do ensino desenvolvimental, reconhece o contínuo processo de abstração e concretização.

Assim, por exemplo, ao se levantar o questionamento “como tenho energia elétrica em casa?” poderíamos começar relacionando uma noção de movimento “algo acontece para a energia elétrica *chegar* aqui em casa”. Com o suporte do professor, trabalha-se a abstração do conceito de movimento de uma maneira ampla, com diferentes exemplos no eletromagnetismo, para então aplicá-lo ao problema investigado “o que se movimenta *no nosso caso?*”. Ora, o movimento está tanto na noção da conversão de energia – energia mecânica da queda d’água em energia elétrica, no caso da hidrelétrica – quanto na transmissão.

Esses questionamentos podem fazer parte de um diálogo estruturado guiado pelo professor conforme aplicado por Hedegaard (1996) em uma experiência didática sobre o ensino da evolução das espécies:

O que estamos pesquisando? O que sabemos e o que não sabemos a respeito do nosso problema? Como podemos mostrar o que sabemos e o que estamos investigando em nosso modelo teórico? Como vamos explorar ainda mais essas questões? (HEDEGAARD, 1996, p. 15, tradução nossa).

Em nosso caso, com relação à geração da energia elétrica, vimos que não é *qualquer* movimento que nos interessa, mas sim aquele capaz de produzir uma *variação*. Variação do quê? Do campo magnético ou da corrente em um condutor. Nesse momento, novamente com a ajuda do professor, ascende a um abstrato mais generalizado “o que significa variar um campo magnético ou uma corrente? Variar no espaço? No tempo? A intensidade? O ângulo?”.

Destacando-se esses parâmetros de análise, volta-se a um “novo concreto”, modificado, no qual os alunos devem ser estimulados a pensarem e produzirem de maneira criativa e autônoma “qual máquina produz determinada variação? Como eu [aluno] posso melhorar essa máquina ou imaginar uma diferente? Quais são alguns dos desafios da engenharia para obter tal equipamento? Quais foram os processos históricos que culminaram na criação e no uso de tal máquina pela sociedade atual? Por que essa máquina não surgiu antes na história da humanidade? O que faltava e o que se alterou em nosso conhecimento? Qual a relação custo-benefício das máquinas que temos? Há outras máquinas que geram energia elétrica de forma menos danosa ao meio ambiente? Diferentes sociedades ou culturas utilizam as mesmas ou outras máquinas? Como a máquina de determinado local ou sociedade funciona? O conceito TCU de variação está presente nessas máquinas? De que maneira?”. É evidente que a profundidade de investigação e a autonomia dos alunos devem ser dosadas conforme o grau de instrução e o objetivo da atividade de ensino.

Os estudantes também podem apresentar um exemplo próprio “como funciona o microondas que eu tenho em casa?”. E agora? Por onde começar a investigação? Ora, **por que não começar pelos conceitos TCU?**⁷⁴

Então, investigaremos: “será que para entender o forno de microondas, eu preciso do conceito de variação? Ou seria interação? Ou uma combinação de ambos? De que maneira eles se combinam?”.

Uma vez escolhido o(s) conceito(s) inicial(is) de análise – note que aqui estamos no campo abstrato – então questiona-se “como esse conceito se apresenta no exemplo do microondas? Algo interage? O que e como? Como eu posso investigar essa relação? Temos o suficiente para compreender o fenômeno?” E aqui voltamos ao concreto, um novo concreto, ampliado, complexificado. Esse movimento de vaivém é perpétuo e caracteriza o pensamento teórico que esperamos da educação escolar em geral, e do ensino de ciências em particular.

⁷⁴ Lembremos o que fizemos: apresentamos um modelo teórico para o ensino de eletromagnetismo segundo três conceitos TCU. Por hipótese, eles devem estar presentes em todos os fenômenos eletromagnéticos relevantes às práticas sociais e compor também um ponto de chegada dos estudantes.

Esse processo que descrevemos a respeito da formação de conceitos moldado em um processo dinâmico entre o concreto e o abstrato pode ser ilustrado pela figura 5.

Figura 5. Múltiplos movimentos de descensões e ascensões no processo de formação e compressão dos conceitos.

Fonte: Lago, Ortega e Mattos (2020, p. 127).

A partir desses movimentos entre os conceitos TCU e as práticas sociais que envolvem o eletromagnetismo, os exemplos concretos de análise, constrói-se e promove-se o desenvolvimento intelectual dos alunos, permitindo que eles atuem autonomamente com relação aos objetos, ponto central da teoria do ensino desenvolvimental davydoviana.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Parafraseando Saviani, nessa seção não temos a intenção de fechar a discussão; esta parte se apresenta no trabalho simplesmente porque, em algum momento, ele deve dar-se por encerrado. Consideramos que o momento em que o encerramos seja, talvez, o que apresenta alguma condição para que seja iniciado. Noutras palavras, somente agora que temos, reunidos, elementos-chaves para iniciar encaminhamentos de respostas, limites e problemas das questões investigadas.

Retomando as colocações da *Introdução*, devemos fazer notar o fato de que a concepção de matéria de ensino e de seu papel na organização escolar varia de acordo com a concepção de escola, de suas funções na sociedade e do tipo de indivíduo que se pretende formar, entre outros fatores. Não levamos

a discussão da dissertação para esse rumo; rumo este que aprofundaria características que semeiam o debate da educação e de currículo em amplas concepções. Contudo, destacamos uma função da educação escolar que investigaríamos: promover o desenvolvimento do pensamento teórico nos estudantes. Esse foi o ponto de partida dessa dissertação. Concomitantemente, vimos que esse olhar para a educação está inserido na teoria do ensino desenvolvimental elaborada por Davydov (1988a, 1990), pautada em pilares da teoria histórico-cultural de Vigotski e colaboradores.

Pensamento teórico ou pensamento científico? Conceito teórico, conceito científico ou conceito abstrato? Nesse momento, ainda na *Introdução*, sentimos a necessidade de oferecer algum esclarecimento a respeito da linguagem utilizada. Acontece que a distinção lexical é menos importante para nós, mesmo porque a literatura e os dicionários praticam permutações desses termos, cada qual podendo aparecer no revestimento sinonímico do outro. Mas no intuito de esclarecer um cenário comum de discussão, adotamos o termo conceito TCU para expressar, com menos ambiguidade, uma ideia já existente na teoria davydoviana.

Esclarecida a confusão terminológica, o que Davydov (1990) deseja sustentar resulta perfeitamente claro: há diferentes tipos de conceitos, que são obtidos de maneiras distintas, que servem a diferentes propósitos, logo apresentam diferentes características e, portanto, sustentam diferentes formas de conhecimento e pensamento. Assim, as definições de conceito TCU, pensamento teórico e conhecimento teórico estão necessariamente ligadas a alguns pressupostos adotados por Davydov, mas quais?

Ao longo da discussão do referencial teórico, no capítulo 3, temos que Davydov se apropria de pressupostos da teoria histórico-cultural como (i) a possibilidade de desenvolver funções psicológicas superiores nas crianças através de atividades em um modelo planejado de ensino, a partir (ii) da apropriação da cultura, implicando em mudanças na mente humana como a generalização e formação de conceitos, ultrapassando os limites da experiência sensorial imediata.

Tais pressupostos se localizam principalmente na área da psicologia. Contudo, Davydov (1988a), também interessado com a educação, cunhou a teoria desenvolvimental. Esta teoria adicionaria outros pressupostos, dos quais destacamos: (iii) a realidade possui uma estrutura interna, uma essência. Isto

é, há relações que são críticas e necessárias para o entendimento do atual estado de um objeto e de mudanças que ele possa vir a sofrer, (iv) é através da aquisição do conhecimento teórico que se estrutura a formação do pensamento teórico e, por conseguinte, o desenvolvimento psíquico da criança, e (v) a generalização teórica é um meio para investigar a essência do objeto.

Tal estrutura até aqui apresentada poderia encerrar-se, ela própria, em uma dissertação vista a riqueza de seus pilares. Contudo, nos propusemos a “concretizar” tais entendimentos da teoria do ensino desenvolvimental a um objeto específico, não nos limitando a um entendimento amplo da teoria. Destacamos esse como o principal momento de tensão da dissertação: a seleção das relações essenciais ensino eletromagnetismo para ser o nosso objeto de análise. Com isso, nos perguntamos: seria possível um diálogo entre a teoria de Davydov (1988a, 1990) e o ensino de Física, em particular, do eletromagnetismo?

Como comentado, não encontramos referências nesse assunto, e por isso não tivemos exemplos concretos que nos auxiliassem nessa investigação. Primeiro, os trabalhos analisados que escreveram sobre o ensino de eletromagnetismo não utilizaram a teoria do ensino desenvolvimental como referencial teórico. Segundo, os trabalhos que se apropriam da teoria histórico-cultural como referencial teórico, utilizam principalmente dos conceitos de interação, mediação e zona de desenvolvimento proximal, como mostrado por Bonfim, Solino e Gehlen (2019) e pela nossa revisão. Por um lado, essas constatações foram excitantes: essa dissertação poderia vir a contribuir com um elo original na corrente das pesquisas em teoria do ensino desenvolvimental, ao submetê-la à Física e vice-versa. Por outro lado, foi uma construção solitária e que não apresentou tantos diálogos quanto gostaríamos com outros autores.

Nesse momento, um parêntesis sobre a relação entre a teoria histórico-cultural aplicada aos cenários concretos do ensino de Física no geral: este é o ponto no qual eu, o autor, pessoalmente, enfrento as maiores limitações e sinto mais dificuldades para, não só me definir, como, principalmente, entendê-las. De um lado, admito pela minha insuficiência teórica neste terreno. Por outro, sinto falta de exemplos que relacionem textos que utilizam a teoria histórico-cultural às situações concretas do ensino de Física. Escritos genéricos na linha de “em se tratando de aprendizagem, é importante motivar o aluno, mediar a

aprendizagem de conceitos, assim como é essencial que o aluno se conscientize da sua própria atividade em contexto individual e social” são pouco esclarecedoras e pouco contribuem com uma real mudança de atitude por parte do professor. O que significa mediar o conceito de carga elétrica, ou ainda, o que *não seria* uma mediação do conceito de carga elétrica? Quais exemplos concretos? Será que se está ensinando conceitos científicos relevantes? Quais podem ser esses conceitos? Note que não estou à procura de respostas, mas de diferentes exemplos. Não acredito que haja respostas certas para essas perguntas, mas acredito que haja exemplos em diferentes contextos que possam contribuir para respondê-las. Os conceitos de mediação, interação, zona de desenvolvimento proximal, atividade, entre outros, são definidos no campo da psicologia histórico-cultural, mas sinto que ainda são escassos os paralelos no contexto pedagógico do ensino de eletromagnetismo. Ao longo da elaboração dessa dissertação construí a impressão de que diversos artigos em ensino de eletromagnetismo se estruturam em algo como: “após apresentado uma introdução, contextualizando o problema do qual esse artigo se refere, é apresentado uma seção ‘fundamentação teórica’ que constará de trechos acerca dos trabalhos do referencial teórico [até aqui está perfeito, mas ainda não ‘conectou’ a fundamentação teórica própria do campo da psicologia ou da educação ao contexto pedagógico do ensino de eletromagnetismo] e agora está ‘apto’ a apresentar a próxima seção sobre a investigação do problema: a construção de X, ou o uso de Y, ou a sequência didática Z, enfim”. Calma. Mas e uma seção que discuta a fundamentação teórica aplicada àquele conceito físico particular? Bom, talvez ela esteja contida na apresentação da sequência didática. No fim, o artigo acabou e pouco (ou nada) desse paralelo foi apresentado. Com isso, fica uma *sensação*: os autores estavam principalmente relatando sobre como a psicologia histórico-cultural define determinados conceitos. O que estou tentando dizer é que dentro da sala de aula, *já vai ocorrer* “mediação” e “interação” – e aqui falo no sentido do senso comum – entre o professor e os alunos, e entre os próprios alunos; e os alunos vão tocar e interagir com o experimento etc. Contudo, assim como não é porque a aula aconteceu com falas e diálogo que ela é *dialógica em sentido freireano*, que também não é porque os alunos se juntaram em grupo e o professor passava pelas carteiras que a atividade de ensino ocorreu segundo o conceito de *mediação descrito pela teoria histórico-cultural*. Finalmente, *não é*

*porque os conceitos são de origem científica que eles são conceitos TCU da qual a teoria do ensino desenvolvimental se refere, sendo necessário análises sobre estes conceitos e principalmente uma **valorização por essa investigação**. Percebo a teoria histórico-cultural no geral, e a teoria do ensino desenvolvimental em particular, como um poderoso alicerce para a fundamentação de sequências didáticas para além da importância da mediação. Explico: mediar a relação aluno-professor, contextualizar o conteúdo, e a interação social são essenciais, já sabemos. **A literatura da área já apresenta consenso sobre isso**. Os trabalhos em ensino de eletromagnetismo poderiam investir menos tempo relatando como psicólogos e/ou pedagogos descrevem as fundamentações teóricas (o que já sabemos por outros artigos e livros) e mais tempo em como *eles, professores de física, se apropriam de conceitos criados no contexto teórico psicológico em uma atividade de ensino de circuitos elétricos, por exemplo*. Este último que verdadeiramente é o palco de debate, e que penso não ser consensual. Afinal, todos concordam com Davydov (1990) sobre o pensamento teórico ser construído a partir do trabalho das relações universais; o que teóricos que utilizam deste referencial poderiam discordar é *quais são as relações universais*. Como as pesquisas na área avançarão em toda sua potencialidade se falta exatamente aquilo que é “debatível”? Afinal, se discordássemos de Davydov (1990) sobre o pensamento teórico ser construído a partir do trabalho das relações universais, **então nem usaríamos esse referencial para início de conversa**. Desse modo, uma importante discussão que contribuiria significativamente para essa área de pesquisa é, por exemplo: de um lado A) sabe-se, devido a corrente teórica histórico-cultural, que o conceito de interação é importante para compreensão dos conceitos científicos. Do outro lado B) temos a partir do livro didático, da literatura ou da formação acadêmica, a presença de vários conceitos científicos. **Basta escolher um conceito em B) e depois criar condições em sala de aula que estimulem a interação entre os alunos? Não**. Por que o conceito de campo foi escolhido para mediação, para início de conversa? Trabalhar com esse conceito oferece a possibilidade de mediações “mais ricas, abrangentes, interessantes etc” do que, digamos, força? Como quais? Ou campo foi escolhido porque ele estava na sequência do livro didático, mas na verdade, poderia ter sido escolhido força? Ou então foi escolhido campo, porque os alunos já estudaram cargas elétricas, depois eles*

estudarão força, depois potencial elétrico, depois efeito Hall e depois isso e aquilo e mais aquilo outro? Ou então todos estes são apenas conceitos derivados e suas importâncias dependem do contexto, sendo assim o foco do trabalho pedagógico poderia ser no trabalho das relações universais como *movimento*, *variação* e *interação*, conforme propusemos? Foi escolhido trabalhar o conceito de potencial elétrico pois este possui alguma relação considerada relevante para o desenvolvimento do pensamento teórico ou por que sem ele o aluno não consegue responder qual é o potencial elétrico de uma carga elétrica de $2 \times 10^{-11}\text{C}$ a 3 metros de distância, considerando zero o potencial a uma distância infinita? Por que trabalhar circuitos elétricos com resistor e capacitor? Há um conjunto de relações específicas e importantes nas práticas sociais que apenas esse tipo de circuito elétrico pode oferecer, ou que esse circuito mais facilmente oferece? Ou este circuito foi escolhido por que os alunos já estudaram circuito elétrico com resistor, e agora estudam circuitos com resistor e capacitor, para então depois estudarem um circuito com resistor, capacitor e indutor? Ou então por que se espera que os alunos sejam capazes de trocar uma resistência elétrica de chuveiro algum dia logo após as aulas antes que se esqueçam e partam para consultar o YouTube que apresenta algumas centenas de vídeos de como fazer o trabalho? Ou então apenas para ilustrar uma aplicação da Lei de Kirchhoff? No fundo, trabalha-se determinado conceito X pois pensa-se que X é importante *per si* ou por que este conceito X é construído sob interessante manipulação das relações substantivas que constituem determinado modelo teórico? Certamente muitos outros exemplos podem ser apresentados. Resumo parte desses questionamentos com: *quais foram, em linhas gerais, os processos de pensamento que permitiram a elaboração dessa(s) mediação com esses conceitos, a ponto de oferecer subsídios para que professores e pesquisadores, leitores do trabalho, possam, eles mesmos, terem subsídios para construírem suas próprias mediações, congruentes com seus contextos, **preferindo tais relações** em vez de outras?* Esta é apenas uma das questões que sinto falta, e percebo que parte deste sentimento é de certa forma compartilhado, vide semelhantes questões levantadas em recente editorial (PEREIRA, 2020). Enfim, fecho esse parêntesis apontando que essa dissertação tentou tanger algumas dessas importantes questões, e que tentei clarificar, dentro de minha capacidade intelectual e teórica, quais relações podem ser mais promissoras no ensino de

eletromagnetismo para o desenvolvimento intelectual do aluno. Por fim, talvez tenha faltado um estudo mais aprofundado do referencial teórico, ou maior maturidade de pesquisa, ou maior tempo de análise, ou mais debates com os pares, ou todos os anteriores.

Avançando com as considerações, apresentamos alguns resultados da pesquisa que culminaram no capítulo 2. O ensino de eletromagnetismo, tanto do fundamental I quanto ao ensino superior, apresenta o consenso de: fazer um ímã grudar em um metal para “mostrar” a existência do campo magnético ou apresentar uma simulação que ilustre a corrente elétrica em um circuito, ainda é pouco para ajudar o aluno a se apropriar dos conceitos. Há muitas mediações entre o conhecimento acumulado e o conhecimento pessoal do aluno, e esse processo é complexo, sendo necessário – talvez indispensável – um referencial teórico que auxilie o professor a nortear a sua prática docente. A teoria do ensino desenvolvimental é uma sugestão de referencial teórico. Mas antes de mostrarmos uma possível relação entre Davydov e o ensino de eletromagnetismo, sentimos a necessidade de entender quais são os referenciais teóricos já utilizados atualmente no ensino de eletromagnetismo, e principalmente, se estes norteariam o conteúdo a ser ensinado.

Notamos, com a revisão da literatura, que há diversos referenciais teóricos da área da educação e da psicologia utilizados pelos autores que se propõem a escrever sobre o ensino eletromagnetismo. Contudo, percebemos que os autores se apropriam desses referenciais principalmente na maneira relacionada ao “como fazer” e não no “o que ensinar”. Ou seja, houve pouca – ou nenhuma – discussão a respeito do porque foi escolhido determinado conceito. Ou então, dado determinado conteúdo por motivo de força maior (como imposição curricular), como selecionar quais são os conceitos centrais dentro daquele conteúdo. Isso pode ser porque esses próprios referenciais não ofereçam uma discussão a esse respeito, ou porque os autores não dominam o referencial teórico que adotam, ou talvez porque os autores não tiveram uma formação apropriada nesse sentido, ou ainda porque os autores simplesmente estão mais interessados no método do que no conteúdo, entre muitas outras combinações de fatores. De todo modo, fica como reflexão, e demanda pesquisas posteriores.

A partir do exposto, somos capazes de apresentar algumas considerações sobre os capítulos 4 e 5 (separados por razões didáticas de

apresentação, uma vez que consideramos o conteúdo e sua aplicação uma unidade dialética). O ensino de eletromagnetismo foi selecionado para o caso concreto da análise de conteúdo. Apresentamos um desenvolvimento do estudo histórico e lógico para entendermos como se deu o processo de gênese e evolução de seus conceitos. Esse olhar para a história do desenvolvimento dos conceitos do eletromagnetismo foi separado em duas partes: da China antiga até Oersted, e de Oersted até os dias atuais. Desse movimento de análise, notamos que muitos foram os nomes e os modelos utilizados para explicar uma variedade de fenômenos do eletromagnetismo. Contudo, algumas “coisas” parecem constantes: *as relações que se referem à ideia de movimento, variação e interação.*

Com a seleção desses três conceitos – que como vimos não são *conceitos abstratos* quaisquer do eletromagnetismo, mas podem ser conceitos TCU – revisitamos o desenvolvimento histórico individual desses conceitos. A partir do olhar para a atividade social do uso da energia elétrica, no capítulo 5, apontamos passos que circundam o pensamento teórico no qual o aluno apreende o conceito em sua totalidade, interiorizando-o, fazendo dele uma “ferramenta mental” de análise em situações concretas e abstratas.

O espantoso aumento dos conhecimentos no atual milênio coloca problemas novos ao ensino de Física quando a preocupação da escola é cumprir com o papel de transmissão do conhecimento. Contudo, esse aumento de conhecimentos é apenas uma faceta do problema. Precisamos refletir sobre o que ensinar, qual conteúdo deve ser prioridade. Dizer que são os “conteúdos clássicos” que devem ser ensinados (DUARTE, 2016) ainda é vago, quais são os conteúdos clássicos da Física? Para alguns, o conteúdo é necessariamente subordinado ao contexto do estudante. Para outros, o inverso ocorre, e agora há o conteúdo “neutro” que pode ser trabalhado em todos os contextos. Para nós, o conteúdo e o contexto se entrelaçam dialeticamente, um define o outro, e o trabalho com o conteúdo é um meio para o desenvolvimento de processos mentais complexos como a generalização e o pensamento teórico.

Essa dissertação se encerra apontando apenas alguns interessantes direcionamentos para futuras pesquisas no assunto: (i) levar a discussão teórica desse trabalho para o contexto escolar, colocando em prática as propostas aqui apresentadas, e assim compreendendo os conceitos em sua *concretridade*; (ii) qualificar como – e se até mesmo faz sentido essa busca –

a generalização desenvolvida por estudantes que foram estimulados a estudarem o eletromagnetismo a partir dos conceitos TCU aqui apresentados se diferem da generalização dos estudantes que estudaram o eletromagnetismo a partir da apresentação sequencial de conceitos como vistos em livros didáticos; (iii) Em que medida uma investigação dos conceitos TCU do ensino de Física Clássica como um todo apresentaria os mesmos conceitos TCU que apresentamos analisando apenas o ensino de eletromagnetismo? O que acarreta em (iv) é possível uma conciliação entre os conceitos TCU de todas as áreas clássicas do ensino de Física de tal maneira que este forme um modelo teórico que possa compor ou nortear uma base nacional comum curricular, por exemplo?

Não estamos tentando reduzir todo o conhecimento e possibilidades a respeito do ensino de eletromagnetismo em conceitos TCU. Mas assumindo que há um tempo limitado na instrução escolar, então educadores e professores precisam tomar algumas decisões sobre qual deveria ser o foco do ensino. Assim, sugerimos a teoria do ensino desenvolvimental como uma boa candidata de referencial teórico que oferece caminhos para esse questionamento.

REFERÊNCIAS

ALLEN, J. et al. Effects of the March 1989 solar activity. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 70, n. 46, p. 1479-1488, 1989

ALMEIDA, M. J. P. M. Prescrições e recomendações ao professor na solução de problemas do ensino na educação em ciências. **Ciência & Ensino**, v. 1, n. 1, 2006.

AKHUTINA, T. **A.R. Luria: uma trajetória de vida**. Em: Andréa Maturano Longarezi e Roberto Valdés Puentes (Org.). Ensino desenvolvimental: vida, pensamento e obra dos principais representantes russos. 3ª ed. Uberlândia: EDUFU, p. 125-149, 2017.

ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos a tecnologias computacionais no ensino de Física. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 4, n. 3, p. 5-18, 2004.

ARAUJO, E. S.; MORAES, S.P.G. **Dos princípios da pesquisa em educação como atividade**. Em: Manoel Oriosvaldo de Moura. (Org.). Educação escolar e pesquisa na teoria histórico-cultural. São Paulo: Loyola, p. 47-70, 2017.

ARAUJO, E. S. **Rubinstein: um grande psicólogo, uma grande personalidade.** Em: Andréa Maturano Longarezi e Roberto Valdés Puentes (Org.). Ensino desenvolvimental: vida, pensamento e obra dos principais representantes russos. 3ª ed. Uberlândia: EDUFU, p. 151-176, 2017.

ARQUES, C. C. Construcción de un altavoz con dos CD. **Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias.**, v. 8, n. extra, p. 422–426, 2011.

ASSIS, A. K. T. Weber's Force versus Lorentz's Force. **Physics Essays**, v. 8, p. 335-341, 1995.

ASSIS, A. K.T. Comparação entre as eletrodinâmicas de Weber e de Maxwell-Lorentz. **Episteme**, v. 3, n. 6, p.7-15, 1998.

ASSUMPÇÃO, M. P. **Contribuições de davydov para a organização do ensino.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Estadual de Maringá. 2016.

ASTOLFI, J.P.; DEVELAY, M. **A didática das ciências.** Tradução Magda S. S. Fonseca. Campinas: Papirus, 1990.

AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. **Psicologia Educacional.** Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.

AUSUBEL, D. P. **Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva.** Tradução Lígia Teopisto. Rio de Janeiro: Interamericana, 2003.

AZEVEDO, R. L. Uso de organizadores prévios na aprendizagem significativa do eletromagnetismo. **Acta Scientiae: Revista de Ensino de Ciências e Matemática.** p. 17, 2013.

AZEVEDO, L. B.; FIREMAN, E. C. Sequência de Ensino Investigativa: Problematizando Aulas de Ciências nos Anos Iniciais com Conteúdos de Eletricidade. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 8, n. 2, p. 143-161, 2017.

BALDWIN, J. A talk to teachers. **Child development and learning**, p. 7-12, 1963.

BAGNO, E.; EYLON, B. From problem solving to a knowledge structure: An example from the domain of electromagnetism. **American Journal of Physics**, v. 65, n. 726, p. 726-736, 1997.

BARBOSA, E.; BULCÃO, M. **Bachelard: a pedagogia da razão, pedagogia da imaginação.** 2ª ed. Petrópolis: Vozes, 2011.

BARAM-TSABARI, A.; YARDEN, A. Characterizing children's spontaneous interests in science and technology. **International Journal of Science Education**, v. 27, n. 7, p. 803-826, 2005.

BATISTA, C. A. S.; PEDUZZI, L. O. Q. Concepções epistemológicas de Larry Laudan: uma ampla revisão bibliográfica nos principais periódicos brasileiros do ensino de ciências e ensino de física. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 24, n. 2, p. 38-55, 2019.

BELÉNDEZ, A. La unificación de luz, electricidad y magnetism: la “sistensis electromagnética” de Maxwell. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 2, 2601, 2008.

BENDER, A. L.; SBARDELOTTO, D. R.; MAGNO, W. C. Using DC motors in Physics experiments. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 4, p. 401–405, dez. 2004.

BEZERRA, V. A. Maxwell, a teoria do campo e a desmecanização da física. **Scientiae Studia**, v. 4, n. 2, 2006.

BLUME, S. W. **Electric power system basics for the nonelectrical professional**. John Wiley & Sons; 2016 Dec 5.

BOGDAN, R. C.; BIKLEN, S. K. **Qualitative research for education: An introduction to theories and models**. Foundations of Qualitative research for Education, 1-11. 1992.

BONFIM, V.; SOLINO, A. P.; GEHLEN, S. T. Vygotsky na pesquisa em educação em ciências no Brasil: um panorama histórico. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 18, n. 1, p. 224-250, 2019.

BORGES, L. B. **Ensino e aprendizagem de física: contribuições da teoria de Davydov**. 154f. Tese (Doutorado em Educação). Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia, 2016.

BOSS, S. L. B.; S. M.P.F.; CALUZI, J. J. Fontes primárias e aprendizagem significativa: aquisição de subsunçores para a aprendizagem do conceito de carga elétrica. **ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS—ENPEC**, v. 7, 2009.

BOOS, S. L. B.; SOUZA FILHO, M. P.; MIANUTTI, J.; CALUZI, J. J. Inserção de conceitos e experimentos físicos nos anos iniciais do ensino fundamental: uma análise à luz da teoria de Vigotski. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 14, n. 3, p. 289-312, 2012.

BOTELER, D. H. The super storms of August/September 1859 and their effects on the telegraph system. **Advances in Space Research**, v. 38, n. 2, p. 159-172, 2006.

BRAGA, M. M.; TEIXEIRA, R. M. R. Relato de uma experiência didática envolvendo o tratamento do eletromagnetismo no ensino médio com um enfoque conceitual. **Encontro Estadual de Ensino de Física**. Atas. Porto Alegre: Instituto de Física-UFRGS, 2006.

BRANQUINHO, J.; GOMES, N.; MURCHO, D. **Enciclopédia de termos lógico-filosóficos**. Martins Fontes, 2006.

BUCHWALD, J. Z. **The creation of scientific effects: Heinrich Hertz and electric waves**. University of Chicago Press, 1994.

CABRERA, B. First results from a superconductive detector for moving magnetic monopoles. **Physical Review Letters**, v. 48, n. 20, 1982.

CAMARGO, E. P.; NARDI, R. O emprego de linguagens acessíveis para alunos com deficiência visual em aulas de eletromagnetismo. **Acta Scientiae**, v. 10, n. 1, p. 97-118, 2008.

CAMPBELL, W. H. An interpretation of induced electric currents in long pipelines caused by natural geomagnetic sources of the upper atmosphere. **Surveys in Geophysics**, v. 8, n. 3, p. 239-259, 1986.

CAMPOS, L.B. **Proposta de abordagem temática com enfoque CTS no ensino de física: produção de energia elétrica**. 2017. 131f. Dissertação (Mestrado em Educação em Ciências e Matemática). Instituto de Educação. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

CARLSON, J. B. Lodestone Compass: Chinese or Olmec Primacy?: Multidisciplinary analysis of an Olmec hematite artifact from San Lorenzo, Veracruz, Mexico. **Science**, 189(4205), 753–760, 1975.

CASPERSON, J. M.; LINN, M. C. Using visualizations to teach electrostatics. **American Journal of Physics**, v. 74, n. 4, p. 316-323, 2006.

CATELLI, F.; VILLAS-BOAS, V. Exploração de alguns conceitos do eletromagnetismo no movimento do braço de um disco. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 2, 3 out. 2011.

CARVALHO, F. W. S. **Transformador de frequência variável aplicado à geração hidrelétrica com rotação variável**. 2011. 64f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Energia). Universidade Federal de Itajubá. Minas Gerais.

CAVALCANTI, M. H. S.; RIBEIRO, M. M.; BARRO, M. R. Planejamento de uma sequência didática sobre energia elétrica na perspectiva CTS. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 24, n. 4, p. 859-874, 2018.

CEDRO, W.L.; NASCIMENTO, C.P. **Dos métodos e das metodologias em pesquisas educacionais na teoria histórico-cultural**. Manoel Oriosvaldo de Moura (Org.). Em: Educação escolar e pesquisa na teoria histórico-cultural. São Paulo: Loyola, 2017.

CAVALLERI, G. et al. Experimental proof of standard electrodynamics by measuring the self-force on a part of a current loop. **Physical review e**, v. 58, n. 2, p. 2505, 1998.

CHAIB, J.P.M.C.; ASSIS, A.K.T. Experiência de Oersted em sala de aula. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n.1, p.41-51. 2007.

CHAIB, J.P.M C.; ASSIS, A. K.T. Distorção da obra eletromagnética de Ampère nos livros didáticos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 65-70, 2007.

CHAIB, J. P. M.; ASSIS, A. K. Ampère e a origem do magnetismo terrestre. I Simpósio de Pesquisa em Ensino de História de Ciências da Terra. In: III Simpósio Nacional sobre Ensino de Geologia no Brasil. **Atas...** Campinas: Unicamp, 2011.

CHAIKLIN, S. **Developmental teaching in upper-secondary school**. Em: HEDEGAARD, M. e LOMPSCHER, J. (Org.). Learning activity an development. Aarhus (Dinamarca): Aarhus University Press, 1999, p. 187-210.

CHAIKLIN, S. **A developmental teaching approach to schooling**. Em: Gordon Wells e Guy Claxton (Org.). Learning for life in the 21st century: Sociocultural perspectives on the future of education. Blackwell publishing. p. 167-180, 2002.

CHRISTIDOU, V. Greek Students' Science-related Interests and Experiences: Gender differences and correlations. **International Journal of Science Education**, v. 28, n. 10, p. 1181-1199, 2006.

COLIN, P.; VIENNOT, L. Using two models in optics: Students' difficulties and suggestions for teaching. **American Journal of Physics**, v. 69, n. S1, p. 36-44, 2001.

CORRERA, F.S. **Cabos Coaxiais: ondas eletromagnéticas em meios guiados**. 2017. 30f. Notas de Aula.

COSTA JR., E. et al. O vento solar e a atividade geomagnética. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 4, p.4301, 2011.

COVER, M. Marxismo e metodologia da ciência social: aprendizados, limites e possibilidades. **ANAIS DO IV SIMPÓSIO LUTAS SOCIAIS NA AMÉRICA LATINA**, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010, p. 162-170.

CUDMANI, L. C.; FONTDEVILA, P. Física básica: a organização de conteúdos no ensino aprendizagem do eletromagnetismo. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 6, n. 3, p. 196-210, 1989.

DAMASIO, F.; PEDUZZI, L. O. Para que ensinar ciência no século XXI?- reflexões a partir da filosofia de Feyerabend e do ensino subversivo para uma aprendizagem significativa crítica. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 20, e2951, p. 1-18, 2018.

DANIELS, H. Vygotsky: between socio-cultural relativism and historical materialism. **Cultural-Historical Psychology**, v. 14, n. 3, p. 36-42, 2018.

DAVÝDOV, V. V. **Tipos de generalización em la enseñanza**. Havana: Pueblo y Educación, 1982.

DAVYDOV, V.; MÁRKOVA, A. **La concepción de la actividad de estudio de los escolares**. Tradução Marta Shuare. La psicología evolutiva y pedagógica en la URSS: antología. Moscou: Progreso, p. 316-337, 1987.

DAVYDOV, V. V. **Problems of developmental teaching: the experience of theoretical and experimental psychological research**. Tradução de José Carlos Libâneo e Raquel A. M. da Madeira Freitas. Soviet Education, Agosto, v. XXX, nº 8, 1988a.

DAVYDOV, V. V. Learning Activity in the Younger School-age Period, **Soviet Education**, v. 30, n. 9, p. 3-47, 1988b.

DAVYDOV, V.V. What is formal learning activity? **Journal of Russian & East European Psychology**, v. 36, n.4, p. 37-47, 1998.

DAVYDOV, V. V. **Types of Generalization in Instruction: Logical and Psychological Problems in the Structuring of School Curricula**. National Council of Teachers of Mathematics. 1990.

DE SOUZA, G. B.; NOGUEIRA, A.R. A.; RASSINI, J. B. Determinação de matéria seca e umidade em solos e plantas com forno de microondas doméstico. **Embrapa Pecuária Sudeste-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2002.

DIAS, M. S.; SOUZA, N.M.M. **A atividade de formação do professor na licenciatura e na docência**. Manoel Oriosvaldo de Moura (Org.). Em: Educação escolar e pesquisa na teoria histórico-cultural. São Paulo: Loyola, 2017.

DUARTE, N. A escola de Vigotski e a educação escolar: algumas hipóteses para uma leitura pedagógica da psicologia histórico-cultural. **Psicologia USP**, v. 7, n. 1-2, p. 17-50, 1996.

DUARTE, N. **Os conteúdos escolares e a ressurreição dos mortos: contribuição à teoria histórico-crítica do currículo**. Campinas, SP: Autores Associados, 2016.

ERTHAL, J. P. C.; GASPAR, A. Atividades experimentais de demonstração para o ensino de corrente alternada ao nível do ensino médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 23, n. 3, p. 345-359, 2006.

ESPINOSA, T.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Crenças de autoeficácia em aprender Física e trabalhar colaborativamente: um estudo de caso com o método Team-Based Learning em uma disciplina de Física Básica. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 12, n. 1, p. 29-54, 2019.

FACCI, M. G. D.; TULESKI, S. C. Da apropriação da cultura ao processo de humanização: o desenvolvimento das funções psicológicas superiores. In: **Anais do II Encontro Brasileiro de Estudos Marxistas**. Curitiba, 2006.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R.B.; SANDS, M. **The Feynman lectures on physics: mainly electromagnetism and matter**. California Institute of Technology. 6ª ed. 1977.

FREIESLEBEN, F. B.; LODER, L. L.; BECKER, M. L. R. Uma metodologia de Pesquisa sobre a construção de conhecimentos em circuitos elétricos lineares elaborada com base no método clínico piagetiano. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 17, n. 3, p. 1037-1060, 2017.

FREITAS, R. A. M. M. Teoria histórico-cultural, educação escolar e didática. **Revista Educativa-Revista de Educação**, v. 19, n. 2, p. 346-352, 2016.

GARDELLI, D. Antecedentes históricos ao surgimento do Eletromagnetismo. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 35, n. 1, p. 118-137, 2018.

GASPAR, A. Cinquenta anos de ensino de física: muitos equívocos, alguns acertos e a necessidade do resgate do papel do professor. In: XV Encontro de Físicos do Norte e Nordeste. **Atas...** Natal: Rio Grande do Norte, 1997. p. 1-13

GASPAR, A.; MONTEIRO, I. C. C. Atividades experimentais de demonstrações em sala de aula: uma análise segundo o referencial da teoria de Vygotsky. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 10, n. 2, p. 227-254, 2005.

GILBERT, J. K.; BOULTER, C.; RUTHERFORD, M. Models in explanations, Part 1: Horses for courses?. **International Journal of Science Education**, v. 20, n. 1, p. 83-97, 1998.

GRECA, I. M., COSTA, S. S. C.; MOREIRA, M. A. Análise descritiva e crítica dos trabalhos de pesquisa submetidos ao III ENPEC. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 2, n. 1, p.73-82, 2002.

GRIGORE, I.; MIRON, C.; BARNA, E. S. Constructivist tools for the study of the special theory of relativity. In: Proceedings of the 9th International Scientific Conference eLearning and Software for Education. **Atas...** Bucareste, 2013.

GUERRA, A.; REIS, J.C.; BRAGA, M.A.B. Uma abordagem histórico-filosófica para o eletromagnetismo no ensino médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 21, p. 224-248, 2004.

GONZALES, E. G.; ROSA, P. R. S. Aprendizagem significativa de conceitos de circuitos elétricos utilizando um ambiente virtual de ensino por alunos da Educação de Jovens e Adultos. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 19, n. 2, p. 477-504, 2014.

HAKE, R. R. Interactive-engagement versus traditional methods: a six-thousand-student survey. of mechanics test data for introductory physics courses. **American Journal of Physics**, v. 66, n.1, p. 64-74, 1998.

HEDEGAARD, M. How Instruction Influences Children's Concepts of Evolution, **Mind, Culture, and Activity**, v. 3, n. 1, 11-24, 1996.

HEDEGAARD, M. **A zona de desenvolvimento proximal como base para o ensino.** Uma introdução a Vygotsky. In: DANIELS, H. (Org.). São Paulo: Loyola, p. 199-227, 2002.

HEDEGAARD, M.; CHAIKLIN, S. **Radical-local teaching and learning: a cultural-historical approach.** Aarhus N; Oakville, CT: Aarhus University Press, 2005.

HEIMANN, P. M. Maxwell, Hertz, and the nature of electricity. **Isis**, v. 62, n. 2, p. 149-157, 1971.

HEWITT, P. G. **Física conceitual.** Porto Alegre: Artmed Editora, 2002.

HOWE, A. C. Development of science concepts within a vygotskian framework. **Science Education**, v. 80, n.1, p. 35-51, 1996.

ILYENKOV, E. V. **Dialectical Logic, Essays on its History and Theory.** Translated H. Campbell Creighton. Progress Publishers, 1977.

ILYENKOV, E. V. Knowledge and Thinking. **Journal of Russian & East European Psychology**, v. 45, n. 4, p. 75–80, ago. 2007.

ILYENKOV, E. V. **The dialectics of the abstract and the concrete in Marx's Capital.** Moscou: Progress, 2008.

JARDIM, W. T.; GUERRA, A. República das Letras, Academias e Sociedades Científicas no século XVIII: a garrafa de Leiden e a ciência no ensino. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 3, p. 774-797, 2017.

JUNGINGER, J. E.; POPOVIC, Z. D. An experimental investigation of the influence of an electrostatic potential on electron mass as predicted by Weber's force law. **Canadian Journal of Physics**, v. 82, n. 9, p. 731-735, 2004.

KAPPENMAN, J. G.; ALBERTSON, V. D.; MOHAN, N. Current transformer and relay performance in the presence of geomagnetically-induced currents. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, n. 3, p. 1078-1088, 1981.

KRAPAS, S.; SILVA, M. C. O conceito de campo: polissemia nos manuais, significados na física. **Ciência & Educação**, v. 14, n. 1, p. 15-33, 2008.

KOPNIN, P. V. **A dialética como lógica e teoria do conhecimento.** Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1978.

KRAUSE, D. **Tópicos em ontologia analítica.** São Paulo, SP: UNESP, 2017.

KURTH, W. S. The great solar storms of 1989. **Nature**, v. 353, n. 6346, p. 705-706, 1991.

LABAS, M. **Uma proposta de abordagem histórico-experimental da lei de indução eletromagnética de Faraday à luz da teoria da aprendizagem significativa.** 2016. 194f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa.

LABURÚ, C. E.; GOUVEIA, A. A.; BARROS, M. A. Estudo de circuitos elétricos por meio de desenhos dos alunos: Uma estratégia pedagógica para explicitar as dificuldades conceituais. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 26, n.1, p. 24-47, 2009.

LAGO, L.; ORTEGA, J. L.; MATTOS, C. O modelo genético e o movimento dinâmico entre abstrato e concreto como instrumentos para o planejamento de sequências didáticas para o ensino de ciências. **Alexandria**, v. 13, n.1, p.123-153, 2020.

LIBÂNEO, J. C.; FREITAS, R.A.M.M. Vygotsky, Leontiev, Davydov—três aportes teóricos para a teoria histórico-cultural e suas contribuições para a didática. In: **IV Congresso Brasileiro de História da Educação-SBHE**. 2006.

LIBANEIO, J.C.; FREITAS, R. A. M. M. **Vasily Vasilyevich Davydov: a escola e a formação do pensamento teórico-científico**. Andréa Maturano Longarezi e Roberto Valdés Puentes (Org.). Ensino desenvolvimental: vida, pensamento e obra dos principais representantes russos. 3ª ed. Uberlândia: EDUFU, p.331-366, 2017.

LIMA, R. S. **Padronização de projetos elétricos de pequenas centrais hidrelétricas**. 2002. 139f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais.

LOBO, D. A. **Ensino de ciências nos anos iniciais do ensino fundamental: a formação de conceitos científicos e o desenvolvimento dos alunos**. 2018. 110f. Dissertação (Mestrado em Educação). Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia.

LONGAREZI, A.M.; PUENTES, R.B. **Ensino desenvolvimental: vida, pensamento e obra dos principais representantes russos**. Andréa Maturano Longarezi e Roberto Valdés Puentes (Org.). Ensino desenvolvimental: vida, pensamento e obra dos principais representantes russos. 3ª ed. Uberlândia: EDUFU, p. 21-25, 2017.

LOPES, D. P. M.; STEIN-BARANA, A. C. de M.; MORENO, L. X. Construção de um guindaste eletromagnético para fins didáticos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 26, n. 1, 2009.

LÖRINCZ, I.; TAJMAR, M. Experimental investigation of the influence of spatially distributed charges on the inertial mass of moving electrons as predicted by Weber's electrodynamics. **Canadian Journal of Physics**, v. 95, n. 10, p.1023-1029, 2017.

MACEDO, C. C.; SILVA, L. F. Contextualização e visões de ciência e tecnologia nos livros didáticos de Física aprovados pelo PNLEM. **Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v. 3, n. 3, p. 01-23. 2010.

MACÊDO, J. A. de; DICKMAN, A. G.; ANDRADE, I. S. F. de. Simulações computacionais como ferramentas para o ensino de conceitos básicos de Eletricidade. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. 0, 2012.

MACHADO, K. D. **Teoria do eletromagnetismo**. Volume 1. Ponta Grossa: Editora UEPG. 2000.

MACHADO, K. D. **Teoria do eletromagnetismo**. Volume 2. Ponta Grossa: Editora UEPG. 2002.

MACHADO, K. D. **Teoria do eletromagnetismo**. Volume 3. Ponta Grossa: Editora UEPG. 2006.

MACIEL, G. M. C. Física, CTSA e interdisciplinaridade no ensino médio com a temática: reciclagem e energia elétrica. 2010.

MAGALHÃES, Murilo de F.; SANTOS, Wilma M. S.; DIAS, Penha M. C. Uma proposta para ensinar campo elétrico e magnético: uma aplicação da história da Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n.4, 2002.

MAI, I. **Utilizando um forno de microondas e um disco rígido de computador como laboratório de física**. 2008. 143f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

MARENGÃO, L. A. **O ensino de física no ensino médio: descrevendo um experimento didático na perspectiva histórico-cultural**. 2011. 114f. Dissertação (Mestrado em Educação). Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia.

MARTINS, R. A. Ørsted e a descoberta do eletromagnetismo. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 10, 1986. p. 89-114.

MARTINS, R. A. Contribuição do conhecimento histórico ao ensino do eletromagnetismo. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, 5 (Número Especial), p. 49-57, 1988.

MARTINS, R. A. Alessandro Volta e a invenção da pilha: dificuldades no estabelecimento da identidade entre o galvanismo e a eletricidade. **Acta Scientiarum**, v. 21, n. 4, p. 823-835, 1999.

MARTINS, A. A.; GARCIA, N. M. D. Ensino de Física e Novas Tecnologias de Informação e Comunicação: Uma Análise da Produção Recente. In: XIX Simpósio Nacional de Ensino de Física. **Atas...** Manaus: Amazônia, 2011.

MARX, K. **Contribuição à crítica da economia política**. Tradução Florestan Fernandes. 2ª ed. Editora: expressão popular. São Paulo, 2008, p.258-259.

MARX, Karl. **O Capital: crítica da economia política**. Rio de Janeiro: Ed. Civilização Brasileira, 2008.

MATOS, M. G.; VALADARES, J. O efeito da actividade experimental na aprendizagem da ciência pelas crianças do primeiro ciclo do ensino básico. **Investigações em ensino de ciências**, v. 6, n.2, p. 227-239, 2001.

MATTOS, C. R. **Livro didático na atividade educacional: a parte ou o todo?**. Em: Nilson Marcos Dias Garcia; Milton Antonio Auth; Eduardo Kojv Takahashi. (Org.). *Enfrentamentos do ensino de física na sociedade contemporânea*. 1ed. São Paulo: LF Editorial, v.1, p.103-120, 2016.

MELONI, A.; LANZEROTTI, L. J.; GREGORI, G. P. Induction of currents in long submarine cables by natural phenomena. **Reviews of Geophysics**, v. 21, n. 4, p. 795-803, 1983.

MILTON, K. A. Theoretical and experimental status of magnetic monopoles. **Reports on Progress in Physics**, v. 69, n. 6, 2006.

MONTEIRO, I. C. C.; GASPAR, A. Um estudo sobre as emoções no contexto das interações sociais em sala de aula. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 12, n.1, p. 71-84, 2007.

MONTEIRO, I. C. C., MONTEIRO, M. A. A., GERMANO, J. S. E.; GASPAR, A. As atividades de uma demonstração e a teoria de Vigotski: um motor elétrico de fácil construção e de baixo custo. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 27, n.2, p. 371-384, 2010.

MORAES, C. J. C.; OLIVEIRA, C. M.; GOLDSCHMIDT, A. I. Elaboração de estratégias de ensino e uso dos estatutos do conhecimento: os obstáculos na construção do conhecimento de Ciências-Física. **Amazônia: Revista de Educação em Ciências e Matemáticas**, v. 13, n. 28, p. 23, 2017.

MOREIRA, M. A. **Mapas conceituais e diagramas V**. Porto Alegre: Ed. do Autor, 2006.

MOTTELAY, P. F. **Bibliographical history of electricity and magnetism cronologically arranged**. London: Charles Griffin & Company Limited, 1922.

MOURA, M. O. et al. A atividade orientadora de ensino como unidade entre ensino e aprendizagem. Em: **A atividade pedagógica na teoria histórico-cultural**. Campinas: Autores Associados. 2ª ed. 2016.

MÜLLER, M. G.; BRANDÃO, R. V.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Implementação do método de ensino Peer Instruction com o auxílio dos computadores do projeto “UCA” em aulas de Física do Ensino Médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. 0, 2012.

NASCIMENTO, C.P.; ARAUJO, E.S.; MIGUEIS, M.R. **O conteúdo e a estrutura da atividade de ensino na educação infantil: o papel do jogo**. Manoel Oriosvaldo de Moura (Org.). Em: *A atividade pedagógica na teoria histórico-cultural*. Campinas: Autores Associados, 2016.

NÚÑEZ, I. B.; OLIVEIRA, M. D. **Ya. Galperin: a vida e a obra do criador da teoria da formação por etapas das ações mentais e dos conceitos**. Andréa Maturano Longarezi e Roberto Valdés Puentes (Org.). *Ensino desenvolvimental: vida, pensamento e obra dos principais representantes russos*. 3ª ed. Uberlândia: EDUFU, p. 283-313, 2013.

OLIVEIRA, R. A. L. C. **Aprendizagem baseada em problemas e o ensino do conceito de geração de energia elétrica.** 2019. 74f. Dissertação (Mestrado Profissional Ensino de Física) Universidade Estadual Paulista.

OLIVEIRA, E. S.; REIS, N. A.; SILVA, E. L. Contextualização histórica dos estudos de Faraday sobre eletricidade e matéria: contribuições para o ensino de ciências. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 9, n.3, p. 87-105, 2018.

OLIVEIRA, V.; VEIT, E. A.; ARAUJO, I. S. Relato de experiência com os métodos Ensino sob Medida (Just-in-Time Teaching) e Instrução pelos Colegas (Peer Instruction) para o Ensino de Tópicos de Eletromagnetismo no nível médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 1, p. 180, 2015.

OSBORNE, J.; HENNESSY, S. **Literature review in science education and the role of ICT: promise, problems and future directions.** London: Futurelab Research. 2003.

PANOSSIAN, M. L.; MORETTI, V. D.; SOUZA, F. D. **Relações entre movimento histórico e lógico de um conceito, desenvolvimento do pensamento teórico e conteúdo escolar.** Manoel Oriosvaldo de Moura (Org.). Em: Educação escolar e pesquisa na teoria histórico-cultural. São Paulo: Loyola, 2017.

PAULA, H.F. Fundamentos pedagógicos para o uso de simulações e laboratórios virtuais no ensino de ciências. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 17, n.1, p. 75-103, 2017.

PAULA, H. F.; TALIM, S. L. Uso coordenado de ambientes virtuais e outros recursos mediacionais. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29(n. esp.), p. 614-650, 2012.

PAZ, A. M. **Atividades experimentais e informatizadas: contribuições para o ensino de eletromagnetismo.** 2007. 228 f. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

PEDUZZI, L.O. Q. Física aristotélica: por que não considerá-la no ensino da mecânica. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 13, n. 1, p. 48-63, 1996.

PEDROSO, L.S.; de Araújo, M.S.T. Aprendizagem significativa de conceitos de eletromagnetismo utilizando simulações interativas no ensino médio. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 3, p. 512-523, 2012.

PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F. Sobre o ensino de física moderna e contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 14, n.3, p. 393-420, 2009.

PEREIRA, M. M. Sentidos do (e no) Ensino de Física no Ensino Médio: articulações com a teoria histórico-cultural. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 37, n. 1, p. 1-5, 2020.

PESSOA JUNIOR, O. Fisicalismo reutivo e sondas epistemológicas. In: III Encontro da Rede Paranaense de Pesquisa em História e Filosofia da Ciência. **Atas...** Curitiba: SCHLA/UFPR, 2005.

PESSOA JUNIOR, O Modelo causal dos primórdios da ciência do magnetismo. **Scientiae Studia**, v. 8, n. 2, 2010.

PIEPER, F. C.; ANDRADE NETO, A. S. Evidências da emergência de drivers hiperculturais durante o aprendizado de conceitos de eletromagnetismo em alunos do Ensino Médio após a utilização de simulações computacionais. **Acta Scientiae**, v. 17, n. 3, 2015.

PIMENTEL, J. R.; ZUMPANO, V. H. Demonstre em aula: correntes de Foucault exploradas com um disco rígido de computador. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 25, n. 1, 2008.

PINTO, J. A. F.; SILVA, A. P. B.; FERREIRA, É. J. B. Laboratório desafiador e história da ciência: um relato de experiência com o experimento de Oersted. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 1, p. 176, 2017.

PIOTTO, D. C.; ASBAHR, F. S. F.; FURLANETTO, F.R. **Significação e sentido na psicologia histórico-cultural: implicações para a educação escolar**. Manoel Oriosvaldo de Moura (Org.). Em: Educação escolar e pesquisa na teoria histórico-cultural. São Paulo: Loyola, 2017.

PIRES, C. F. de J. S.; FERRARI, P. C.; OLIVEIRA QUEIROZ, J. R. de. A tecnologia do motor elétrico para o ensino de Eletromagnetismo numa abordagem problematizadora. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 6, n. 3, 2013.

PIRJOLA, R. On currents induced in power transmission systems during geomagnetic variations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, n. 10, p. 2825-2831, 1985.

PONTONE JUNIOR, R.; PAULA, H.F. Um diagnóstico das publicações sobre o uso, no ensino de ciências, de simulações e laboratórios virtuais, entre 2009 e 2014. In: X Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências. **Atas...** Águas de Lindóia: São Paulo, 2015. p. 1-8.

PRESCOTT, G. B. **History, theory, and practice of the electric telegraph**. 4ª Ed. Boston: Ticknor and Fields, 1866.

PRESTES, Z.; TUNES, E.; NASCIMENTO, R. **Lev Semionovitch Vigotski: um estudo da vida e da obra do criador da psicologia histórico-cultural**. Em: Andréa Maturano Longarezi e Roberto Valdés Puentes (Org.). Ensino desenvolvimental: vida, pensamento e obra dos principais representantes russos. 3ª ed. Uberlândia: EDUFU, p. 59-79, 2017

PUENTES, R V.; LONGAREZI, A. M. Escola e didática desenvolvimental: seu campo conceitual na tradição da teoria histórico-cultural. **Educação em revista**, v. 29, n. 1, p. 247-271, 2013.

PURCELL, E. M. **Eletricidade e magnetismo. Curso de Física de Berkeley.** Volume 2. São Paulo: Edgard Blucher Ltda.1970.

QUEIROZ, R. et al. Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 13, n. 13, p. 2774-2784, 2013.

QUINTAS, M. J.; CARVALHO, P. S. Ensino interativo na abordagem de Eletricidade numa escola portuguesa. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n.3, p. 839-860, 2016.

REIMER, M.; MICHAELSON, E. **Reference** The Stanford Encyclopedia of Philosophy Edward N. Zalta(ed.).Spring 2019 Edition.

REGO, T.C. **Vygotsky uma perspectiva histórico-cultural da educação.** 25ª ed. Petrópolis: Vozes, 2017.

RESENDE, T. F.; FIREMAN, E. C. Explorando o conceito de magnetismo com alunos do curso de licenciatura em pedagogia a distância da UFAL: reflexões sobre o uso de experimentos didáticos no ensino de ciências da natureza nos anos iniciais da educação básica. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 5, n.1, p. 76-91, 2014.

RICARDO, E. C. Problematização e contextualização no ensino de física. *Ensino de Física. São Paulo: Cengage Learning*, p. 29-48. 2010.

RIGON, A. J.; ASBAHR, F. S. F.; MORETTI, V. D. Sobre o processo de humanização. Em: **A atividade pedagógica na teoria histórico-cultural.** Campinas: Autores Associados. 2ª ed. 2016.

RINALDI, E.; GUERRA, A. História da ciência e o uso da instrumentação: construção de um transmissor de voz como estratégia de ensino. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, 2011.

ROCHA, C. A. **Elos entre a formação para o ensino de física e as novas tecnologias.** 2001. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ROCHA, C. H.; CATARINO, G.F.C. Kit experimental para ensino do eletromagnetismo: uma proposta de produto educacional. **Revista de Educação, Ciências e Matemática**, v. 9, n. 1, 2019.

ROCHA, J. F. M. O conceito de "campo" em sala de aula: uma abordagem histórico-conceitual. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 1, p. 1604.1-1604.17, 2009.

RODRIGUES, A. M. **Redimensionando a noção de aprendizagem nas relações entre perfil conceitual e contexto: uma abordagem sócio-cultural-histórica.** 2009. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Interunidades em Ensino de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ROLLER, D.; ROLLER, D. H. D. **The development of the concept of electric charge: electricity from the Greeks to Coulomb**. In: CONANT, J. B.; NASH, L. K. (Orgs.). *Harvard Case Histories in Experimental Science*. Cambridge-Massachusetts: Harvard University Press, 1957

ROSA, J. E.; MORAES, S. P. G.; CEDRO, W.L. **As particularidades do pensamento empírico e do pensamento teórico na organização do ensino**. Manoel Oriosvaldo de Moura (Org.). Em: *A atividade pedagógica na teoria histórico-cultural*. Campinas: Autores Associados, 2016.

ROSA, J. E.; DAMAZIO, A. **O ensino de matemática no primeiro ano escolar: uma articulação entre a proposição gepapeana e davydoviana**. Manoel Oriosvaldo de Moura (Org.). Em: *Educação escolar e pesquisa na teoria histórico-cultural*. São Paulo: Loyola, 2017.

SABA, M. M. F.; ROSA, R. A. da S. Measuring Distances with Walkie-Talkies. **The Physics Teacher**, v. 43, n. 4, p. 204–205, 2005.

SAĞLAM, M.; MILLAR, R. Upper high school students' understanding of electromagnetism. **International Journal of Science Education**, v. 28, n. 5, p. 543-566, 2006.

SALÉM, S. **Estruturas conceituais no ensino de física: uma aplicação à eletrostática**. 1986. 245f. Dissertação. (Mestrado Ensino de Ciências). Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo.

SAVIANI, N. **Saber escolar, currículo e didática: problemas da unidade conteúdo/método no processo pedagógico**. 2ª Ed. Campinas: Autores Associados, 1998.

SCARINCI, A. L., et al. Modelos Representacionais da Estrutura da Matéria e o Ensino de Eletricidade. **Anais do XVIII Simpósio Nacional de Ensino de Física**. 2009.

SCARINCI, A. L.; PACCA, J. L. A. O conhecimento de física em um curso de formação contínua. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 10, n.3, p. 51-70, 2010.

SCHIFFMANN, R. F. **Industrial microwave heating of food: principles and three case studies of its commercialization**. Em: *Case studies in novel food processing technologies*. Woodhead Publishing, 2010.

SETLIK, J.; HIGA, I. Contribuições e Dificuldades de Práticas de Leitura e Escrita para Ensinar e Aprender Física no Ensino Médio: Reflexões à Luz da Cultura Escolar. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v.19, 2019.

SERWAY, R. A.; JEWETT, J. W. **Princípios de física: vol. 3: eletromagnetismo**. Thomson Learning edições. 2004.

SILVA, C. C. **Da força ao tensor: evolução do conceito físico e da representação matemática do campo eletromagnético**. 2002. 258f. Tese (Doutorado em Ciências) Instituto de Física Gleb Wataghin. UNICAMP.

SILVA, C. C.; MARTINS, R. A. William Thomson e o uso de analogias e modelos no eletromagnetismo. In: XIII Jornadas Epistemologia e Historia de la Ciencia, v. 9, n. 9. **Atas...** Argentina: Córdoba, 2003.

SILVA, F. R.; SANTOS, L. C. A. A produção de energia elétrica em larga escala no Brasil: uma abordagem CTS para o ensino médio. In: III Simpósio Nacional de Ensino de Ciência e Tecnologia. **Atas...** Ponta Grossa – Paraná. 2012.

SILVA, A. C. Eletromagnetismo e o Anti-Herói Magneto: Uma possível abordagem no ensino médio. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 3, n. 2, p. 125-135, 2012.

SILVA, A. C. Uma Possível Associação entre Ciência e Tecnologia no Ensino de Ciências: o exemplo do telefone. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 6, n. 3, 2013.

SILVA, M. C.; KRAPAS, S. Controvérsia ação a distância/ação mediada: abordagens didáticas para o ensino das interações físicas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 471-479, 2007.

SILVA JUNIOR, C.A.B., PEREIRA, J. R., MOTA, G.V.S.; NERO, J.D. Ensinando ciências físicas com experimentos simples no 5º ano do ensino fundamental da educação básica. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**. v. 12, n. 1, 2019.

SILVEIRA, F. L.; MARQUES, N. L. R. Motor elétrico de indução: “uma das dez maiores invenções de todos os tempos”. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n.1, p. 114-129, 2012.

SIQUEIRA, M. R. D. P.; PIETROCOLA, M. Uma breve discussão sobre campo eletromagnético na formação do professor. In: IX Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. **Atas...** Minas Gerais: Jaboticatubas. 2004.

SIQUEIRA, L. M.; TORRES, P. L. O ensino híbrido da eletricidade utilizando objetos de aprendizagem na engenharia. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 27, n.2, p. 334-354, 2010.

SOUSA, C. M. S. G.; MOREIRA, M. A.; MATHEUS, T. A. M. A resolução de situações-problema experimentais no campo conceitual do eletromagnetismo: uma tentativa de identificação de conhecimentos-em-ação. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 5, n.3, p. 61-72, 2005.

SOUSA, C. M. S. G.; FÁVERO, M. H. Análise de uma situação de resolução de problemas de física, em situação de interlocução entre um especialista e um novato, à luz da teoria dos campos conceituais de Vergnaud. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 7, n.1, p. 55-75, 2016.

SOUSA, J. M.; MALHEIROS, A. P. S.; FIGUEIREDO, N. Desenvolvendo práticas investigativas no Ensino Médio: o uso de um Objeto de Aprendizagem no estudo da Força de Lorentz. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, p. 988, 2015.

SOUZA FILHO, M. P. **O erro em sala de aula: subsídios para o ensino do eletromagnetismo**. 230f. Tese (Doutorado Educação em ciências). Faculdade de Ciências da UNESP/Bauru. 2009.

SPOHR, C. B.; GARCIA, I. K.; SANTAROSA, M. C. P. Identificando a evolução no ensino de eletromagnetismo, através de uma UEPS baseada num sistema de som automotivo gerador de energia. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 22, n. 3, p. 162, 2017.

STOCKLMAYER, S. Teaching direct current theory using a field model. **International Journal of Science Education**, v. 32, n. 13, p. 1801-1828, 2010.

TAYLOR, S. J.; BOGDAN, R.; DeVAULT, M. **Introduction to qualitative research methods: a guidebook and resource**. John Wiley and Sons: 2015.

TEIXEIRA, J. N.; MURAMATSU, M.; ALVES, L. A. Um modelo de usina hidrelétrica como ferramenta no ensino de Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 1, p. 248, 2017.

TONIDANDEL, D. A. V.; ARAÚJO, A. E. A.; BOAVENTURA, W. C. História da Eletricidade e do Magnetismo: da Antiguidade à Idade Média. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 4, 2018.

TOSTA, C. G. Vigotski e o desenvolvimento das funções psicológicas superiores. **Perspectivas Em Psicologia**, v. 16, n.1, p.57-67, 2012.

VERGILIO, K. E. P. **Geração Distribuída e Pequenas Centrais Hidrelétricas: Alternativas para a Geração de Energia Elétrica no Brasil**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

VIGODSKAIA, G. L. Guita Ivovna Vigodskaja (1925-2010), filha de Vigotski: entrevista [Entrevistas concedida a] Zoia Prestes. **Cadernos de Pesquisa**, v. 40, n. 141, 2010.

VIGOTSKI, L. S. **A formação social da mente**. (4a. ed.). São Paulo, SP: Martins Fontes. 2002.

VIGOTSKI, L. S. **Teoria e método em psicologia**. (3a. ed.). São Paulo, SP: Martins Fontes. 2004.

VIGOTSKI, L. S. **Pensamiento y habla**. Tradução Alejandro Ariel González. Buenos Aires: Colihue, 2007.

VYGOTSKY, L. S. The collect Works of L. S. Vygotsky. Volume 1. Problems of General Psychology. Tradução de Norris Minick; Editado por Robert W. Rieber; Aaron S. Carter. New York: Plenum Press, 1987.

WENTWORTH, S. M. **Eletromagnetismo aplicado: abordagem antecipada das linhas de transmissão**. Tradução: Fernando Henrique Silveira. Artmed Editora. Porto Alegre. 2009.

WERTSCH, J. V. **Vygotsky and the social formation of mind**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1985.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física III eletromagnetismo**. Tradução Sonia Midori Yamamoto. São Paulo: Addison Wesley, 2009.