

PROTOTIPAGEM DIGITAL DE UM MODELO ANALÓGICO DE UM CIRCUITO ELÉTRICO PARA O ENSINO DE CONCEITOS BÁSICOS DA ELETRODINÂMICA

DIGITAL PROTOTYPING OF AN ANALOGICAL MODEL OF AN ELECTRICAL CIRCUIT FOR TEACHING ELECTRODYNAMICS BASIC CONCEPTS

PROTOTIPADO DIGITAL DE UN MODELO ANALÓGICO DE CIRCUITO ELÉCTRICO PARA LA ENSEÑANZA DE CONCEPTOS BÁSICOS DE ELECTRODINÁMICA

Daniel Mota Ricardo

danielmota83@gmail.com.br

<https://orcid.org/0000-0001-9440-1937>

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Alexandre da Silva Ferry

alexandreferry001@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9626-9634>

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

RESUMO

Este estudo tem como objetivo descrever as etapas da construção de um protótipo digital de um modelo analógico baseado na comparação entre circuitos hidráulicos e elétricos com o propósito de se ensinar conceitos básicos da Eletrodinâmica. O uso de analogias como estratégia didática para o ensino e aprendizado em circuitos elétricos pode ser um valioso recurso, auxiliando no desenvolvimento cognitivo dos estudantes, mas a sua concepção pode ser desafiadora devido, em parte, à complexidade da estrutura relacional comum entre os domínios comparados, capaz de abranger a maior parte dos conceitos de interesse no âmbito da Eletrodinâmica, entre outros aspectos pedagógicos relacionados a esse tipo de recurso didático. De modo semelhante, o uso de modelos também pode envolver aspectos estruturais que demandam certa atenção durante o compartilhamento de significados e atribuição de sentidos em torno das entidades de interesse científico que eles representam. O desafio pode se tornar ainda maior quando lidamos com modelos baseados em analogias: os modelos analógicos, que aparentemente, permitem explorar diversas relações analógicas agrupadas em uma mesma forma de representação, seja ela física (concreta) ou virtual (digital). O método utilizado neste estudo consiste na investigação de elementos, atributos e relações a partir de comparações potencialmente analógicas presentes em livros didáticos de Física envolvendo circuitos elétricos, a fim de permitir a construção de um protótipo digital de um modelo analógico para esse tipo de circuito. Os resultados deste trabalho oferecem contribuições para o desenvolvimento de etapas do processo de construção de modelos analógicos para o ensino de Física, não somente restritas aos conceitos básicos da Eletrodinâmica, mas também a conceitos de outros domínios dessa área de conhecimento e demais componentes curriculares das Ciências.

PALAVRAS-CHAVE: Analogias; Modelos; Eletrodinâmica; Ensino de Física; Modelos analógicos.

ABSTRACT

This study aims to describe the stages of constructing a digital prototype of an analog model based on the comparison between hydraulic and electrical circuits with the purpose of teaching basic Electrodynamics concepts. The use of analogies as a didactic strategy for teaching and learning electrical circuits can be a valuable resource, assisting in the cognitive development of students. However, its conception can be challenging due in part to the complexity of the common relational structure between the compared domains, capable of encompassing most of the concepts of interest within the realm of Electrodynamics, among other pedagogical aspects related to this type of didactic resource. Similarly, the use of models may also involve structural aspects that require careful attention during the sharing of meanings and the attribution of significance to the entities of scientific interest they represent. The challenge can become even greater when dealing with analogy-based models: analog models, which seemingly allow for the exploration of various analogical relationships grouped within a single form of representation, whether it be physical (concrete) or virtual (digital). The method used in this study consists of investigating elements, attributes, and relationships through potentially analogous comparisons found in physics textbooks involving electrical circuits, in order to facilitate the construction of a digital prototype of an analog model for this type of circuit. The results of this work offer contributions to the development of stages in the construction process of analog models for the teaching of physics, not only restricted to basic Electrodynamics concepts but also to concepts from other domains in this field of knowledge and other curricular components of the sciences.

KEYWORDS: Analogies; Models; Electrodynamics; Teaching Physics; Analogical models.

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo describir las etapas de la construcción de un prototipo digital de un modelo analógico basado en la comparación entre circuitos hidráulicos y eléctricos con el propósito de enseñar conceptos básicos de Electrodinámica. El uso de analogías como estrategia didáctica para la enseñanza y el aprendizaje en circuitos eléctricos puede ser un recurso valioso, ayudando al desarrollo cognitivo de los estudiantes, pero su diseño puede resultar

desafiante debido, en parte, a la complejidad de la estructura relacional común entre los dominios comparados. , capaz de abarcar la mayoría de los conceptos de interés dentro del ámbito de la Electrodinámica, entre otros aspectos pedagógicos relacionados con este tipo de recurso didáctico. De manera similar, el uso de modelos también puede involucrar aspectos estructurales que requieren cierta atención a la hora de compartir significados y atribuir significados en torno a las entidades de interés científico que representan. El desafío puede volverse aún mayor cuando se trata de modelos basados en analogías: modelos analógicos, que aparentemente nos permiten explorar varias relaciones analógicas agrupadas en una misma forma de representación, ya sea física (concreta) o virtual (digital). El método utilizado en este estudio consiste en investigar elementos, atributos y relaciones basados en comparaciones potencialmente analógicas presentes en libros de texto de Física que involucran circuitos eléctricos, con el fin de permitir la construcción de un prototipo digital de un modelo analógico para este tipo de circuito. Los resultados de este trabajo ofrecen aportes al desarrollo de etapas en el proceso de construcción de modelos analógicos para la enseñanza de la Física, no solo restringidos a los conceptos básicos de la Electrodinámica, sino también a conceptos de otros dominios de esta área del conocimiento y otros componentes curriculares de Ciencias.

PALABRAS CLAVE: Analogías; Modelos; Electrodinámica; Enseñanza de la Física; Modelos analógicos.

INTRODUÇÃO

A eletrodinâmica, ou simplesmente o estudo dos Circuitos Elétricos, é uma área da Física que trata de fenômenos cujo aprendizado envolve conceitos que demandam alto grau de abstração, exigindo o desenvolvimento de modelos mentais para a sua compreensão (Taber *et al.*, 2006). Nesse contexto, as analogias e os modelos desempenham um papel importante para o seu ensino, pois podem permitir que os estudantes estabeleçam relações de correspondência entre o que já sabem e o que estão aprendendo, entre as representações da modelagem e as entidades científicas, integrando, dessa forma, os novos conceitos da Física ao seu conhecimento existente e às suas percepções sensoriais (Fotou e Abrahams, 2020). Sobre as analogias, podemos dizer que o objetivo do seu uso em sala de aula seria o de apresentar conceitos desconhecidos ou pouco conhecidos a partir de ideias familiares, e, de acordo com Brown e Salter (2010), auxiliar a aprendizagem discente, favorecendo a imaginação de estruturas, sistemas, processos ou ideias das Ciências a partir de coisas mais conhecidas e tangíveis.

Circuitos hidráulicos são frequentemente comparados aos circuitos elétricos, e compreender as potencialidades e limitações dessa analogia pode oferecer ao campo da Educação em Ciências elementos relevantes ao uso desse tipo de recurso didático no ensino (Ugur *et al.*, 2012). No entanto, uma única analogia pode não abranger toda a complexidade das relações similares existentes nos dois domínios comparados. Em um trabalho analisando analogias empregadas para o ensino da Eletrodinâmica, Gentner e Gentner (1983), dizem não achar possível que qualquer analogia individualmente promoverá a total compreensão das complexidades dos circuitos elétricos. Nesse trabalho, por exemplo, para lidar com as limitações de uma analogia entre um circuito elétrico e um circuito hidráulico os autores propõem o uso de outra analogia (com multidões em movimento), avaliada no estudo como mais adequada para determinadas situações.

Outros autores, como Schwedes e Dudeck (1996), fazem uma escolha diferente, optam pela modelagem analógica, preparando, de maneira sofisticada, um domínio base de modo a concentrar o ensino dos conceitos básicos da eletrodinâmica em um só modelo, a partir do qual um conhecimento bem estruturado de circuitos elétricos, o domínio-alvo, possa ser construído e estabelecido. Esse tipo de modelo analógico permite que se estabeleçam várias relações entre elementos e atributos de um circuito elétrico básico, a fim de trabalhar de forma ampla os conceitos básicos da Eletrodinâmica.

Considerando esse tipo de modelagem como um recurso mediador relevante para o estudo da Eletrodinâmica, este trabalho foi realizado com o objetivo de responder às seguintes questões: 1) Quais são os elementos, atributos e relações pertinentes à construção de um modelo analógico de um circuito elétrico, tendo um circuito hidráulico como domínio base, para o ensino de conceitos básicos da Eletrodinâmica?; 2) Como as correspondências de similaridades levantadas na comparação entre o circuito hidráulico e o elétrico podem ser reunidas e representadas em um mesmo modelo analógico?; e 3) De que maneira esse modelo analógico expressa essas

correspondências de similaridade, em especial as relações que fazem parte da estrutura relacional comum da analogia que fundamenta esse modelo?

O desenvolvimento metodológico deste estudo foi dividido em quatro etapas: i) levantamento das analogias, cujo domínio base é o circuito hidráulico, encontradas em livros didáticos de Física; ii) identificação dos elementos, dos atributos e das relações presentes nas analogias listadas; iii) construção de um protótipo digital de um circuito hidráulico que contemple, total ou parcialmente, os elementos, os atributos e as relações encontradas, e iv) análise da consistência estrutural e do foco relacional do modelo analógico por meio do mapeamento estrutural.

REFERENCIAL TEÓRICO

Definição de analogia

Segundo Gentner (1983), analogias são comparações envolvendo correspondências relacionais entre um domínio base (DB). familiar ao interlocutor, e um domínio alvo (DA), que se busca a compreensão. Para indicar que tipo de comparação tem essas correspondências relacionais (classificando assim a comparação como uma analogia), a autora propôs uma teoria para o mapeamento das analogias, a Teoria do Mapeamento de Estruturas (TME). Na TME os elementos e predicados do DB e do DA se relacionam entre si e podem ser mapeados sistematicamente. Contudo, uma distinção simples, mas fundamental, deve ser feita entre os tipos de predicados: devemos distinguir os atributos (os predicados descritivos) das relações existentes (predicados relacionais). Os atributos são predicados baseados em um único argumento dos elementos aos quais se referem, e as relações são predicados baseados em dois ou mais argumentos. Por exemplo: a carga negativa do elétron é um predicado descrito dessa partícula, já o movimento circular dos elétrons ao redor do núcleo de um átomo se configura como um predicado relacional entre os elétrons e o núcleo, isto é, uma relação entre esses dois elementos que constituem a estrutura de um átomo.

Gentner e Markman (1997) propuseram um mapa de similaridades para distinguir entre diferentes tipos de comparações. Segundo os autores, uma analogia é caracterizada por uma alta similaridade nas relações entre os dois domínios em comparação, mas pouca similaridade nos atributos desses elementos. Em outras palavras, uma analogia é uma comparação que envolve correspondências relacionais entre um domínio base e um domínio alvo, em que a estrutura relacional do domínio base pode se alinhar sistematicamente com o domínio alvo. Gentner e Markman (1997) apontam que, no mapeamento das correspondências entre os domínios, três restrições são características fundamentais para considerar uma comparação como uma analogia propriamente dita: a consistência estrutural, o foco relacional e a sistematicidade. Essas características são fundamentais para identificar e compreender adequadamente as analogias em contextos de ensino e pesquisa em Educação em Ciências. Primeiro, o alinhamento entre os domínios deve ser estruturalmente consistente: em outras palavras, deve observar a conectividade paralela e a correspondência um a um.

A conectividade paralela exige que as relações pertinentes no DB tenham argumentos em comparação no DA, e a correspondência um a um limita qualquer elemento em um domínio a no máximo um elemento correspondente no outro domínio (Gentner; Markman, 1997; Holyoak; Thagard, 1989). A segunda limitação característica das analogias é o foco relacional: as analogias devem envolver relações comuns, mas não precisam envolver descrições comuns dos elementos (ou seja, não estamos preocupados em comparar as características físicas dos elementos correspondentes, mas sim as relações existentes entre os elementos, entre os atributos e as relações derivadas de outras relações). A terceira restrição de uma analogia é a sistematicidade: as analogias tendem a corresponder a sistemas conectados de relações (Gentner, 1983). Um

conjunto correspondente de relações interconectadas por relações de ordem superior torna uma correspondência analógica melhor do que um número igual de relações correspondentes que não estão conectadas entre si. O princípio da sistematicidade captura uma preferência por coerência expressa na interconexão das relações identificadas no processamento analógico. Não estamos, no presente estudo, muito interessados em analogias que capturam uma série de coincidências separadamente, mesmo que haja muitas delas.

Gentner e Markman (1997) introduzem ainda dois conceitos importantes para o estudo das analogias: As diferenças alinháveis (*alignable differences*) e as diferenças não-alinháveis (*nonalignable differences*) entre os domínios em comparação. As diferenças alinháveis, que são características que não podem ser comparadas em elementos e atributos em correspondência, e diferenças não alinháveis ou limitações, que são características de um domínio para as quais não há características correspondentes no outro.

Por fim, o último conceito da TME relevante para este trabalho é o da estrutura relacional comum das analogias. No contexto dessa teoria, a efetividade de uma relação analógica depende, principalmente, do tamanho e da profundidade de sua estrutura relacional comum (Gentner, 1983; Gentner; Markman, 1997), decorrente do alinhamento entre os elementos, atributos e relações similares colocados em correspondência. Embora o conceito de estrutura relacional de uma analogia seja um dos principais termos usados nos trabalhos de Gentner e seus colaboradores, a sua definição não aparece formalmente nos trabalhos aos quais tivemos acesso. No entanto, Gentner (1983) nos dá alguns exemplos elucidativos para entendermos o conceito e, ademais, afirma que uma analogia pode ser representada por uma “estrutura na qual um predicado relacional de ordem superior rege as conexões entre os predicados de ordem inferior” (p. 162 – livre tradução). Essa afirmação aliada às três restrições anteriormente apresentadas, a consistência estrutural, o foco relacional e a sistematicidade, nos autoriza a entender o conceito de estrutura relacional comum como um conjunto de relações concatenadas que, uma vez presentes nos dois domínios, representa a estrutura de uma analogia.

Modelos e Modelos Analógicos

As atividades de ensino fundamentadas em modelagem podem ser entendidas como um tipo de prática educativa que envolve processos de produção ou construção de modelos (Mozer; Justi, 2018). Entretanto, o termo modelo é polissêmico, isto é, os possíveis significados atribuídos a esse conceito dependem do seu contexto de aplicação. Neste estudo será considerada a concepção filosófica dos modelos como artefatos epistêmicos. Nessa concepção, segundo Knuuttila (2005), os modelos são vistos como artefatos feitos pelo homem, materializados de alguma forma, portanto, tendo muitas outras funções epistêmicas além da de apenas representar o mundo. Nesse sentido, os modelos são concebidos como ferramentas de pensamento (Gilbert; Justi, 2016).

Esse entendimento conceitual dos modelos, como artefatos epistêmicos, permite, no âmbito da educação em Ciências, que eles sejam concebidos como um instrumento de mediação da aprendizagem, com uma função de auxiliar processos cognitivos, sem a obrigatoriedade de representar toda a natureza das entidades para as quais eles são criados. Além disso, os modelos podem ser utilizados como ferramentas investigativas, pois são parcialmente dependentes das experiências da realidade (Gilbert; Justi, 2016). Para Knuuttila (2005), pensar nos modelos como artefatos, e não apenas como representações, permite que eles possam dar suporte à nossa imaginação sobre como as coisas podem ser e se relacionar. Isso possibilita que os modelos, na condição de artefatos, sejam usados de diferentes maneiras na prática científica, inclusive como uma representação criativa que envolve objetos, processos e ideias.

Pode-se também considerar as várias relações entre analogias e modelos na educação em Ciências. Clement (2008) aponta que um modelo é construído por analogias e que conforme esse se torna mais complexo, várias analogias adicionais podem ser traçadas. Salienta ainda que

tópicos de uma analogia podem se tornar parte de um modelo, mesmo que a analogia não constitua o modelo inteiro. Logo, um modelo não é em si uma analogia e relações analógicas não podem representar todas as relações entre um modelo e a fonte da qual ele se originou. Contudo, analogia e modelagem apresentam algo em comum: ambos os processos se baseiam em relações de similaridade, ora entre o domínio base e o domínio alvo, no caso da analogia, ora entre o domínio representante (o próprio modelo) e o domínio representado (a entidade modelada), no caso da modelagem (Almeida *et al.*, 2018). A respeito dessas relações de similaridades entre o modelo e a entidade de interesse científico representada, Almeida, Almeida e Ferry (2018) e Mozzer e Justi (2018), afirmam que, embora essas relações não se configurem necessariamente como analogias, as analogias podem ser utilizadas no processo de elaboração de modelos.

Assim, de acordo com a visão filosófica de modelos como artefatos epistêmicos (Knuuttila, 2005) utilizados na Ciência e na aprendizagem de Ciências, e entendendo que eles precisam ser pensados sobre o aspecto de sua manipulação, acesso e finalidade pedagógica, consideramos que as analogias podem ser a base para a produção de modelos. Neste sentido, as analogias também podem ser consideradas artefatos epistêmicos, ou seja, como ferramentas que possibilitam pensar sobre a entidade de interesse científico em processo de modelagem, e a partir de um raciocínio analógico, produzir um modelo cuja finalidade didática é a representação do domínio alvo da analogia, definindo assim o que no presente trabalho chamamos de modelo analógico. Em outras palavras, um modelo analógico pode ser compreendido como um artefato epistêmico cuja construção foi fundamentada em alguma analogia.

METODOLOGIA

Levantamento das analogias encontradas

A origem das analogias utilizadas para o ensino de Física é diversa, podendo ter sido planejada ou gerada espontaneamente pelo professor ou pelos próprios estudantes, ou ainda estar presente em livros didáticos. Como esses últimos são um recurso pedagógico importante, tanto para o planejamento de aulas quanto para consulta por professores e estudantes, os utilizamos como fonte para identificar as comparações potencialmente analógicas (CPA's) comumente empregadas no ensino dos conceitos básicos da Eletrodinâmica. Para isso, foram selecionados os livros de Física recomendados pelo Guia de Livros Didáticos do Plano Nacional do Livro Didático (PNLD) dos anos de 2018 e 2021. A fim de ampliar a quantidade de dados levantados e, consequentemente aumentar o repertório de correspondências possíveis de serem feitas na analogia entre circuitos elétricos e circuitos hidráulicos, decidimos por recorrer a livros didáticos também recomendados ou mais utilizados em outros países na Educação Básica. Para tanto, tivemos acesso a um artigo do Instituto Americano de Física (AIP), de Tesfaye e White (2014), que apresenta a relação dos 5 livros didáticos mais utilizados nos Estados Unidos para o ensino de Física no segmento educacional correspondente ao Ensino Médio no Brasil. Foram consultados 12 livros didáticos de Física do PNLD de 2018, 7 livros didáticos de Ciências da Natureza e suas Tecnologias (que tem a Física como componente curricular) do PNLD de 2021 e os 5 livros didáticos norte-americanos, totalizando 24 obras.

Para orientar a busca por comparações que pudessem ser classificadas como analogias entre os domínios de interesse neste trabalho, a partir do nosso referencial teórico, adotamos o conceito de CPA's, entendidas como comparações nas quais foi possível identificar, pela leitura do texto contido no livro didático, um foco relacional entre os elementos e atributos do DB e DA. Segundo o nosso referencial teórico, a caracterização do tipo de comparação existente entre dois domínios envolve o mapeamento estrutural de elementos, atributos e relações constituintes. Entretanto, tal procedimento com cada comparação identificada nos 24 livros consultados, além de pouco viável, demandaria um espaço demasiadamente grande neste artigo. Por isso, iremos considerar que CPA's são comparações nas quais foi possível identificar, pela leitura do texto contido no livro

didático, um foco relacional entre o domínio base e o domínio alvo. Ou seja, as CPA's levantadas são aquelas que evidenciavam correspondências para além das que envolviam somente predicados descritivos dos elementos que constituem os domínios, isto é, para além da mera aparência. Além dessa consideração, para a análise empreendida, delimitamos que Conceitos Básicos da Eletrodinâmica são os conceitos de corrente elétrica, diferença de potencial, fontes de tensão, resistência elétrica, 1ª e 2ª Leis de Ohm e de fundamentos dos circuitos elétricos. Estes serão os conceitos fundamentais que pretendemos abranger nesta pesquisa na construção do protótipo do modelo analógico.

Para a identificação das CPA's, utilizamos 2 procedimentos metodológicos: i) Leitura integral dos capítulos que tratam dos conceitos básicos da Eletrodinâmica, e ii) Utilização das obras didáticas em formato digital PDF e programa de computador leitor de PDF (Adobe Acrobat Reader DC), permitindo a busca por caracteres coringa (ou truncamento). Nessa busca utilizando, por exemplo, os caracteres ANALOG, conseguimos fazer a busca por palavras do documento que tenham esses caracteres na ordem apresentada (seria, portanto, possível achar no texto palavras como analogias, analogamente, análogo). Os caracteres de busca utilizados para identificar no texto as CPA's presentes nos livros nacionais foram: ANALOG, COMPAR, SEMELH, ASSIM COMO, MESM, AGUA, HIDRAUL. Já para os livros em língua inglesa os seguintes caracteres de busca foram utilizados: ANALOG, COMPAR, SIMIL, LIKE, SIMILAR, SAME, THINK, WATER, HYDRAUL.

Na edição do PNLD 2018, foram consultadas 12 coleções de Física recomendadas. No Quadro 1 especificamos a identificação utilizada neste trabalho referente a cada um dos livros didáticos.

Quadro 1: Identificação dos livros didáticos – PNLD 2018

Código	Referência do livro didático
L1	GASPAR, A. Compreendendo a física. 3. ed. São Paulo: Ática, 2016. v. 3
L2	GUIMARÃES, O.; PIQUEIRA, J. R.; CARRON, W. Física. 2. ed. São Paulo: Ática, 2016. v. 3
L3	LUZ, A. M. R.; ÁLVARES, B. A.; GUIMARÃES, C. G. Física: contexto & aplicações: ensino médio. 2. ed. São Paulo: Scipione, 2016. v. 3
L4	VÁLIO, A. B. M. et al. Ser protagonista: física: 3º ano do ensino médio. 3. ed. São Paulo: Edições SM, 2016
L5	YAMAMOTO, K.; FUKU, L. F. Física para o ensino médio. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 2016. v. 3
L6	BISCUOLA, G. J.; VILLAS BÔAS, N.; DOCA, R. H. Física. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2016. v. 3
L7	GONÇALVES FILHO, A.; TOSCANO, C. Física: interação e tecnologia. 2. ed. São Paulo: Leya, 2016. v. 3
L8	BARRETO, B.; XAVIER, C. Física aula por aula: 3º ano. 3. ed. São Paulo: FTD, 2016
L9	BONJORNO, V. et al. Física: 3º ano. 3. ed. São Paulo: FTD, 2016
L10	PIETROCOLA, M. et al. Física em contexto: 3º ano do ensino médio. São Paulo: Editora do Brasil, 2016
L11	TORRES, C. M. A. et al. Física: ciência e tecnologia. 4. ed. São Paulo: Moderna, 2016. v. 3
L12	MARTINI, G. et al. Conexões com a física. 3. ed. São Paulo: Moderna, 2016. v. 3

Fonte: Elaborado pelos autores.

No PNLD 2021, em adequação à Reforma do Ensino Médio, foram selecionadas obras didáticas por área de conhecimento. Portanto o conteúdo de Física está inserido nas coleções da área de conhecimento Ciências da Natureza e suas tecnologias. Cada uma das coleções é composta por 7 obras, contemplando as disciplinas de Física, Química e Biologia. O conteúdo de

conceitos básicos da Eletrodinâmica está presente em todas as coleções recomendadas cuja referência e identificação adotada neste trabalho estão dispostos no Quadro 2.

Quadro 2: Identificação dos livros didáticos – PNLD 2021

Código	Referência do livro didático
L13	MORTIMER, E. et al. Matéria, energia e vida: uma abordagem interdisciplinar – O mundo atual: Questões sociocientíficas. 1. Ed. São Paulo: Scipione, 2020
L14	LOPES, S; ROSSO, S. Ciências da natureza: Lopes & Rosso - Mundo tecnológico e ciências aplicadas. 1. ed. São Paulo: Moderna, 2020
L15	SANTOS, K. C. et al. Diálogo: ciências da natureza e suas tecnologias: Energia e sociedade: uma reflexão necessária. 1. ed. São Paulo: Moderna, 2020
L16	AMABIS, J. M. et al. Moderna plus: ciências da natureza e suas tecnologias: Ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: Moderna, 2020
L17	THOMPSON, M. et al. Conexões: ciências da natureza e suas tecnologias: Energia e ambiente. 1. ed. São Paulo: Moderna, 2020
L18	FUKUI, A. et al. Ser protagonista: ciências da natureza e suas tecnologias: Energia e transformações: 1. ed. São Paulo: Edições SM, 2020
L19	GODOY, L. P; AGNOLO, R. M; MELO W.C. Multiversos: ciências da natureza: eletricidade na sociedade e na vida. 1. ed. – São Paulo: Editora FTD, 2020

Fonte: Elaborado pelos autores.

Já para os livros didáticos do artigo do AIP, buscamos as edições mais atualizadas para cada livro, contudo nem sempre foi possível encontrar a mais atual. As edições utilizadas nesta análise estão especificadas no Quadro 3.

Quadro 3: Identificação dos livros didáticos – AIP

Código	Referência do livro didático
L20	SERWAY, R. A; FAUGHN, J. S. Holt Physics Holt, Rinehart and Winston, 2012
L21	ZITZEWITZ, P. W. ET AL. Physics – Principles and problems. The McGraw-Hill Companies, 2013
L22	HEWITT, P. G. Conceptual Physics. 12. ed. Pearson, 2015
L23	GIANCOLI, D. C. Physics: Principles with Applications. Pearson, 2015
L24	SERWAY, R. A; VUILE, C. College Physics. Brooks/Cole, 2012

Fonte: Elaborado pelos autores.

Prototipagem digital

O protótipo do modelo analógico será desenvolvido de forma que as representações contidas no modelo sejam capazes de, a partir das correspondências estabelecidas entre os elementos, entre os atributos e as relações que constituem os dois circuitos comparados, ser um recurso mediador com potencial de auxiliar a construção de conhecimentos bem estruturados em Eletrodinâmica. Ademais, o protótipo construído deve conter predicados que, de acordo com a TME, tenham foco relacional, seja estruturalmente consistente e sistemático. Esses aspectos são fundamentais e serão verificados e explorados posteriormente.

Escolhemos, dois softwares distintos para o processo de criação do protótipo digital do modelo analógico, o TINKERCAD® e o SOLIDWORKS®. O primeiro foi escolhido inicialmente por ser de uso gratuito e por apresentar funcionalidades de criação de objetos para, por exemplo, impressão tridimensional, bastante intuitivas. Essa plataforma de modelagem 3D pode ser

acessada por meio de um endereço eletrônico próprio: <https://www.tinkercad.com/3d-design>. Com o uso desse software, criamos uma representação lado a lado do domínio representante, o circuito hidráulico, e do domínio representado, isto é, a entidade de interesse científico, o circuito elétrico.

Já o software SOLIDWORKS® é um programa de computações gráfica pago que oferece uma quantidade de recursos mais abrangente, permitindo uma criação mais detalhada de protótipos digitais. Pelas especificidades do modelo analógico, esse foi o software utilizado para integrar os elementos e predicados identificados nas CPA's encontradas nos livros analisados, incorporando-os em um único modelo. Na seção de resultados estão apresentadas imagens desse protótipo digital, oferecendo uma visualização clara e detalhada das representações contidas no modelo analógico e ainda da representação lado a lado dos circuitos hidráulico e elétrico feito com o TINKERCAD.

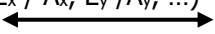
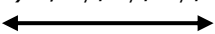
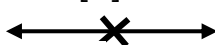
Mapeamento estrutural

Com base nas considerações teóricas e na representação inicialmente proposta por Gentner (1983) sobre as correspondências entre os domínios comparados, optamos por sistematizar as representações das correspondências identificadas por meio da adoção do padrão proposto por Ferry, 2016. Neste esquema de representação, as correspondências entre os elementos de cada domínio são indicadas por setas bidirecionais, acompanhadas pela letra maiúscula "E" e identificadas por um número de ordem. As correspondências entre os atributos desses elementos também foram representadas por setas bidirecionais, acompanhadas pela letra "A", com um número de ordem e endereçada ao elemento diretamente relacionado. As relações foram representadas pelo mesmo sinal gráfico, acompanhadas pela letra minúscula "r" ou maiúscula "R". A letra minúscula representa uma relação de primeira ordem, enquanto a maiúscula representa uma relação de segunda ordem ou de ordem superior. Além desses três tipos de correspondência de similaridade entre elementos, atributos e relações, o mapeamento estrutural das comparações considera os conceitos de diferenças alinháveis e limitações do modelo, conforme descrito por Ferry, 2016.

As diferenças alinháveis foram representadas nesse esquema por setas bidirecionais marcadas com um sinal gráfico semelhante à letra "X", acompanhada pela letra maiúscula "D", identificadas por um número de ordem (D1, D2, D3...) e com o código da correspondência de similaridade a qual essa diferença encontra-se alinhada. Por sua vez, as limitações da comparação foram representadas pelo mesmo sinal gráfico, acompanhadas pela letra maiúscula "L", também identificadas por um número de ordem (L1, L2, L3...) e com um código referente a algum aspecto novo identificado (elemento, atributo ou relação) em um dos domínios que não se aplica ao outro domínio. O Quadro 4 apresenta esse padrão com a mesma adaptação feita por Almeida, Almeida e Ferry, 2018, que utilizaram no lugar das expressões "domínios base" e "domínio alvo", os termos "domínio representante (o modelo)" e "domínio representado (a entidade de interesse científico modelada)", respectivamente.

Quadro 4: Padrão de representação utilizado no mapeamento estrutural de comparações

Domínio representante	Representações das correspondências	Domínio representado
Elementos do modelo	$\longleftrightarrow E_n$	Elementos da entidade representada
Elementos que compõem o modelo	Correspondências entre elementos devem ser representadas por setas bidirecionais acompanhadas pela letra E	Elementos que compõem a entidade de interesse científico
Atributos dos elementos do modelo	$\longleftrightarrow A_n (E_n)$	Atributos dos elementos da entidade representada

Predicados descritivos relevantes dos elementos mapeados no modelo	Correspondências entre atributos devem ser representadas por setas bidirecionais acompanhadas pela letra A; Cada correspondência dessa natureza deve possuir um único argumento, ou seja, deve estar baseada em uma única característica	Predicados descritivos relevantes dos elementos mapeados na entidade representada
Relações de 1ª ordem do modelo	$r_n (E_x / A_x, E_y / A_y, \dots)$ 	Relações de 1ª ordem da entidade representada
Relações entre dois ou mais elementos do modelo ou entre suas características; relações de ordem estrutural que dizem respeito ao modo como os elementos do modelo estão dispostas entre si	Correspondências entre relações de menor complexidade devem ser representadas por setas bidirecionais acompanhadas pela letra r (minúscula); Cada correspondência dessa natureza deve possuir, no mínimo, dois argumentos	Relações entre dois ou mais elementos da entidade representada ou entre suas características; relações de ordem estrutural que revelam como os elementos dessa entidade estão dispostas entre si
Relações de 2ª ordem do modelo	$nhR_n ((nh-1) R, R_y / r_y / E_y / A_y, \dots)$ 	Relações de ordem superior de nível hierárquico ou grau 'nh' da entidade representada
Relações existentes entre relações do modelo, das quais ao menos uma se configura como uma relação de 2ª ordem	Correspondências entre relações de maior complexidade devem ser representadas por setas bidirecionais acompanhadas pelo código nhR ; Cada correspondência dessa natureza deve possuir ao menos uma relação de 2ª ordem como um de seus argumentos	Relações existentes entre relações da entidade representada, das quais ao menos uma se configura como uma relação de 2ª ordem
Determinados atributos ou relações do modelo	$D_n: [...]$ 	Determinados atributos ou relações da entidade representada
Características ou relações presentes no modelo, conectadas a pontos em correspondência, que são diferentes nos respectivos pontos na entidade representada	Diferenças alinháveis. As setas bidirecionais devem ser marcadas com um sinal gráfico semelhante à letra X, e devem ser acompanhadas pela letra D	Características ou relações presentes na entidade representada, conectadas a pontos em correspondência, que são diferentes nos respectivos pontos no modelo
Elementos, Atributos ou Relações do modelo ausentes na entidade representada	$L_n: [...]$ 	Elementos, Atributos ou Relações da entidade representada ausentes no modelo
Condições do modelo para as quais a representação não se aplica; ou, elementos, atributos ou relações do modelo que não devem ser "transferidos" para a entidade representada	Limitações da representação. As setas bidirecionais devem ser marcadas com um sinal gráfico semelhante à letra X, e devem ser acompanhadas pela letra L.	Condições da entidade representada para as quais a representação não se aplica; ou, elementos, atributos ou relações da entidade que não encontram correspondência no modelo

Fonte: Adaptado de Ferry, 2016.

A partir do mapeamento estrutural do modelo analógico, que de certa forma reflete a estrutura de relações da analogia que o fundamenta, deduzimos a sua estrutura relacional comum, a fim de identificar como essas relações aparecem interconectadas e quais atributos e elementos mapeados que compõem, de fato, a estrutura dessa analogia. Conforme o nosso referencial teórico e metodológico, essa estrutura é constituída por um conjunto de expressões de concatenamento nas quais uma relação de ordem superior rege as conexões entre as relações de ordem inferior, que por sua vez conectam atributos e elementos similares também colocados em correspondência na analogia. Por meio dessa estrutura relacional comum também é possível identificar os atributos e elementos que, embora mapeados, não são fundamentais para o estabelecimento da analogia e, conseqüentemente, para a composição do modelo analógico.

RESULTADOS

Na análise das obras selecionadas, identificamos um total de 21 CPA's distribuídas de modo não uniforme entre os três conjuntos de livros didáticos: nas obras do PNLD 2018, identificamos 9 CPA's entre os 12 livros; nas obras do PNLD 2021, apenas uma comparação entre os 7 livros dessa edição do programa; já nas obras do artigo publicado pela AIP, obtivemos um número mais expressivo de comparações, totalizando 11 ocorrências entre apenas 5 livros didáticos. É provável que essas diferenças nas frequências do emprego de analogias entre esses conjuntos de livros didáticos estejam relacionadas com variações nas abordagens feitas pelos autores ou nas orientações pedagógicas dadas pelos programas, como ocorre no caso do PNLD. Contudo, essa questão não se constituiu como objeto de análise neste trabalho.

Destacamos também que algumas CPA's (6 das 21 identificadas) não explicitavam textualmente possíveis correspondências envolvendo relações entre os domínios comparados. Todavia, isso não comprometeu o levantamento realizado, pois as ilustrações associadas com os enunciados das comparações estabelecidas nos permitiam realizar inferências sobre tais relações em correspondência.

Levantamento dos elementos, atributos e relações

Nesta etapa do estudo, nos Quadros 5, 6 e 7 agrupamos os elementos, atributos e relações presentes nas 21 CPA's identificadas. O Quadro 5 exibe os elementos identificados nos dois domínios, o Quadro 6 apresenta os predicados descritivos, isto é, os atributos desses elementos, e o Quadro 7 mostra as relações existentes entre esses elementos e/ou seus atributos. Essa abordagem metodológica propõe a identificação de padrões recorrentes, promovendo a base para a construção do modelo analógico e do seu mapeamento estrutural.

Quadro 5: Elementos dos domínios comparados nas CPA's analisadas

Elementos dos domínios comparados	Número de ocorrências
Circuito hidráulico e circuito elétrico	7
Água e cargas elétricas	4
Tubulação e fiação	4
Bomba d'água e Bateria elétrica	3
Torneira/registro hidráulico e interruptor/chave elétrica	2
Reservatórios e terminais	1

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quadro 6: Atributos dos Elementos dos domínios comparados nas CPA's analisadas

Atributos dos elementos (Predicados descritivos)	Número de ocorrências
Fluxo de água ou moléculas de água com a corrente elétrica ou fluxo de cargas	16
Energia Potencial Gravitacional ou a diferença de energia Potencial Gravitacional com Energia Potencial Elétrica ou a diferença de energia Potencial Elétrica	7
Estreitamento/obstrução no curso d'água com Resistência elétrica	3
Características físicas da tubulação (espessura, comprimento) com a resistividade de um condutor	2
Caminhos em um rio/duos de uma represa com resistência em paralelo	2
Diferença de pressão hidráulica com diferença de potencial elétrico	1

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quadro 7: Relações explícitas nas CPA's analisadas

Relações explícitas (predicados relacionais)	Número de Ocorrências
O fluxo de água ocorre devido à diferença de potencial gravitacional (ou à diferença de nível) entre dois pontos, sendo maior o fluxo quando há uma maior diferença de potencial gravitacional. Como o fluxo de cargas (corrente elétrica) ocorre devido à diferença de potencial elétrico entre dois pontos, sendo maior a corrente elétrica quando há uma maior diferença de potencial elétrico	8
Uma bomba hidráulica pode fornecer energia para as moléculas de água de forma a manter uma diferença de energia gravitacional entre dois pontos e o fluxo de água ser mantido em circuito. Como uma bateria pode fornecer energia para cargas elétricas de forma a manter uma diferença de energia elétrica entre dois pontos e o fluxo de cargas (corrente elétrica) ser mantido em um circuito	3
As moléculas de água não se movem instantaneamente em um circuito hidráulico. A água que sai da torneira, num primeiro momento, já está no circuito e não vem da fonte (local com maior potencial gravitacional) Como as cargas elétricas não se movem instantaneamente em um circuito. A carga que atravessa uma lâmpada, num primeiro momento, já está no circuito e não vem da fonte (local com maior potencial elétrico)	3
Diminuir o diâmetro da tubulação de um circuito hidráulico aumenta a resistência à passagem do fluxo de água. Quanto maior for a diminuição do diâmetro menor será o fluxo de água que atravessa o circuito, como quanto maior for a resistência elétrica menor será a corrente elétrica que atravessa o circuito elétrico	3
Fluxo de água se divide nas ramificações do rio sendo o fluxo total igual a soma do fluxo nas ramificações e, para uma mesma diferença de potencial gravitacional, acrescentar caminhos aumenta o fluxo total no circuito. Como a corrente elétrica que se divide nas ramificações de um circuito em paralelo, sendo a corrente total igual à soma da corrente nas ramificações e, para uma mesma diferença de potencial elétrico, acrescentar caminhos (resistências em paralelo), aumenta a corrente total que percorre o circuito	2
Para haver fluxo de água ou de cargas elétricas, o circuito não pode estar interrompido. Portanto não há fluxo de água em um circuito hidráulico com a torneira fechada, como não há corrente elétrica em um circuito elétrico se a chave ou disjuntor estiver aberto	1
A espessura da tubulação interfere no fluxo de água de um circuito. As tubulações mais finas e longas aumentam a resistência à passagem do fluxo de água, como a espessura da fiação interfere no fluxo de cargas. As fiações mais finas e longas aumentam a resistência à passagem da corrente elétrica	1

Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme os Quadros 5, 6 e 7, encontramos 6 elementos, 6 atributos e 7 relações que, inicialmente, foram tomados como ponto de partida para a prototipagem do modelo analógico. As

primeiras linhas de cada tabela evidenciam o alto número de ocorrências para determinados elementos, atributos e relações, destacando-se as correspondências de similaridade entre: circuito hidráulico e um circuito elétrico; fluxo de água e corrente elétrica; energia potencial gravitacional e energia potencial elétrica; e o fluxo de água associado à diferença de potencial gravitacional em correspondência com o fluxo de cargas elétricas associado à diferença de potencial elétrico. Consideramos que tais correspondências sejam, portanto, imprescindíveis para a prototipagem do modelo analógico.

Prototipagem digital do modelo analógico

Na prototipagem digital realizada não nos limitamos apenas aos elementos, atributos e relações explicitamente encontrados nos livros didáticos e transcritos nos Quadros 5, 6 e 7. Compreendemos que esses dados fornecem uma base sólida para identificar os elementos e predicados relevantes para a construção do modelo analógico. No entanto, consideramos outros aspectos durante a prototipagem, como a experiência do pesquisador em sala de aula, a liberdade criativa e as limitações construtivas para uma possível materialização desse modelo analógico.

Compreendemos também que os textos presentes nos livros didáticos muitas vezes são sucintos, implicando na omissão de detalhes que poderiam ser explorados em sala de aula. Portanto, na construção desse protótipo, nosso objetivo é obter um modelo capaz de abranger as correspondências tipicamente estabelecidas nas comparações analógicas encontradas em livros didáticos, que seja viável em termos de construção e agregue valor didático para as aulas de Eletrodinâmica. Com essa abordagem integrativa e a consideração de múltiplos aspectos na construção do protótipo, podemos associar o modelo analógico prototipado ao conceito de artefatos epistêmicos proposto por Knuuttila (2005), entendidos como ferramentas de pensamento, concebidos e utilizados com a função epistêmica de representação, o que estaria diretamente relacionado com a função didática de mediar os processos de construção e compartilhamento de significados em torno de conceitos, modelos ou teorias científicas no espaço social da sala de aula.

Na Figura 1 apresentamos o protótipo digital criado em que a representação do circuito elétrico se encontra paralelamente apresentada à representação do circuito hidráulico.

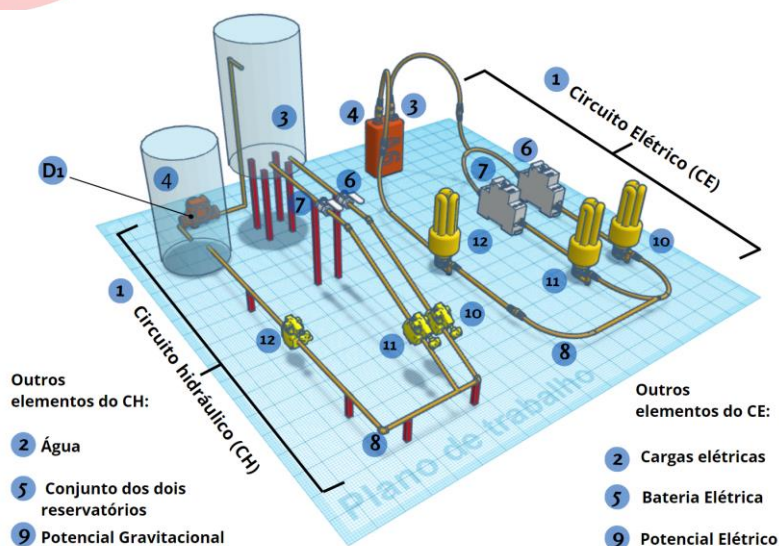


Figura 1: Representação dos domínios em paralelo

Fonte: Elaborado pelos autores.

No Quadro 8 identificamos os elementos constituintes presentes tanto no domínio base, o circuito hidráulico, quanto no domínio alvo o circuito elétrico.

Quadro 8: Elementos constituintes dos modelos no DB e no DA

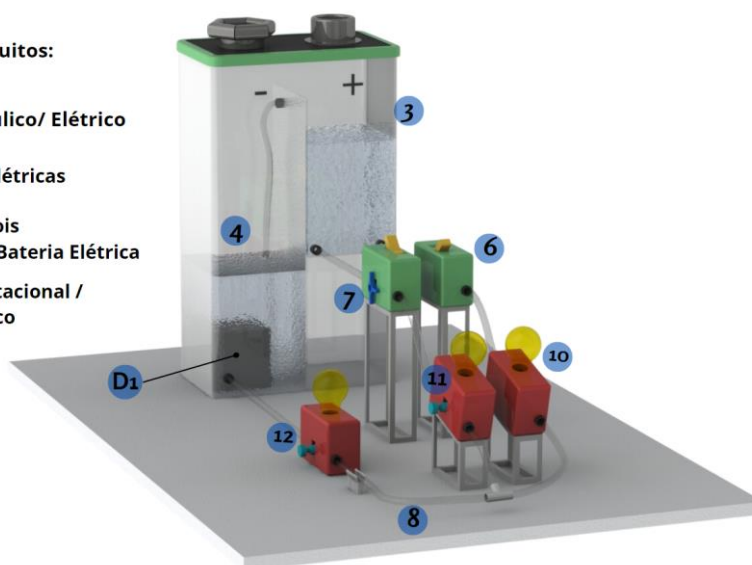
Código	Domínio Base	Domínio Alvo
1	Circuito Hidráulico	Circuito Elétrico
2	Água	Cargas elétricas
3	Reservatório em posição mais elevada	Terminal positivo da bateria
4	Reservatório no nível da base	Terminal negativo da bateria
5	Conjunto dos 2 reservatórios hidráulicos	Bateria Elétrica
6	Válvula (torneira) X	Disjuntor (interruptor) X
7	Válvula (torneira) Y	Disjuntor (interruptor) Y
8	Tubulação hidráulica	Fiação elétrica
9	Potencial Gravitacional	Potencial Elétrico
10	Controlador de fluxo X	Lâmpada (resistor) X
11	Controlador de fluxo Y	Lâmpada (resistor) Y
12	Controlador de fluxo Z	Lâmpada (resistor) Z
D1	Bomba hidráulica	Não há elemento correspondente

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir das representações modeladas na Figura 1, prototipamos um modelo analógico do circuito elétrico (Figura 2) considerando elementos de ambos os circuitos, o elétrico e o hidráulico. A construção desse novo protótipo foi realizada no software SOLIDWORKS. Na Figura 2 podemos observar, de forma mais evidente, a combinação de alguns elementos. Por exemplo, a representação do disjuntor associada à válvula, ambos codificados como E6, é uma maneira de evidenciar a correspondência existente entre esses elementos. Mediante esse tipo de agrupamento, expresso no modelo analógico, é possível potencializar o entendimento da analogia, subsidiando a construção de significados em torno dos conceitos de interesse no domínio representado, neste caso, o circuito elétrico. Do mesmo modo, essa associação pode ser vista nos elementos E3, E4 e E5, em que há um agrupamento do conjunto dos dois reservatórios hidráulicos com a bateria e seus respectivos terminais positivo e negativo.

Outros
elementos dos circuitos:

- 1 Circuito Hidráulico/ Elétrico
- 2 Água / Cargas elétricas
- 5 Conjunto dos dois reservatórios / Bateria Elétrica
- 9 Potencial Gravitacional / Potencial Elétrico

**Figura 2:** Protótipo digital do modelo analógico do circuito elétrico

Fonte: Elaborado pelos autores.

Ao analisar a inclusão no protótipo digital dos 6 elementos e dos 6 atributos identificados nos livros didáticos, constatamos que todos eles estão presentes. Já para o caso das relações levantadas, o protótipo construído abrangeu 6 das 7 relações contidas no Quadro 7. A seguir apresentamos algumas considerações sobre uma dessas correspondências e, também, sobre a relação não contemplada no modelo analógico:

i) Encontramos, por três vezes, a descrição de uma relação nos livros didáticos, na qual uma bomba hidráulica fornece energia às moléculas de água para manter uma diferença de energia potencial gravitacional entre dois pontos, permitindo o fluxo contínuo da água no circuito. Essa relação foi comparada a uma bateria que forneceria energia às cargas elétricas, mantendo uma diferença de energia potencial elétrica entre dois pontos e permitindo o fluxo de corrente elétrica em um circuito. Embora essas características estejam parcialmente presentes no protótipo, essa descrição se refere, na verdade, não a uma relação existente entre os circuitos, mas sim à presença de uma diferença alinhável. No circuito hidráulico, a bomba inserida entre os dois reservatórios tem a função de manter a diferença de potencial gravitacional praticamente constante entre eles. No entanto, no circuito elétrico, a bateria, apesar de possuir funções eletroquímicas, não mantém a diferença de potencial elétrico entre os terminais. Essa diferença de potencial elétrico diminui à medida que a bateria descarrega;

ii) Sobre a relação, identificada apenas uma vez no material analisado, na qual a espessura da tubulação influencia o fluxo de água em um circuito, com tubulações mais finas e longas apresentando uma maior resistência ao fluxo de água, podemos estabelecer uma comparação com a influência da espessura dos fios no fluxo de corrente elétrica. Fios mais finos e longos aumentam a resistência à passagem da corrente elétrica. Embora tenhamos considerado a inclusão de um trecho de tubulação com menor espessura no protótipo digital, julgamos mais instrutivo concentrar a discussão na relação entre as resistências hidráulica e elétrica ao fluxo de água e corrente elétrica nos elementos resistivos. No circuito hidráulico, esses elementos são os controladores de fluxo, enquanto no circuito elétrico são as lâmpadas.

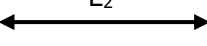
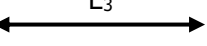
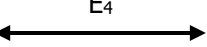
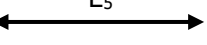
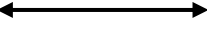
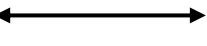
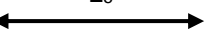
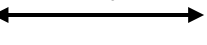
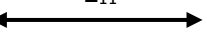
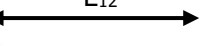
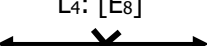
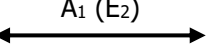
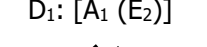
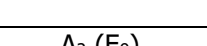
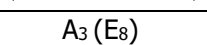
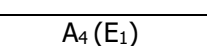
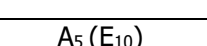
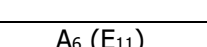
Mapeamento Estrutural

Apresentamos nesta seção o mapeamento estrutural do protótipo do modelo analógico construído de maneira a permitir uma análise estrutural das relações analógicas estabelecidas. O mapeamento mostrado a seguir tem a intenção de apontar as correspondências entre os elementos, predicados (atributos e relações) e diferenças alinháveis relevantes ao contexto de ensino e aprendizagem dos conceitos básicos em Eletrodinâmica encontrados no protótipo 3D. Além disso, pode indicar as possíveis limitações na comparação entre os domínios. Esse mapeamento pode indicar se o modelo prototipado apresenta ou não um potencial analógico em consonância com a TME, como também indicar que seja um recurso didático importante para uso em sala de aula.

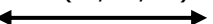
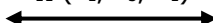
Para a realização do mapeamento estrutural, utilizamos o software “Sistema para Mapeamento Estrutural de Analogias” (MAPES). O MAPES é um software desenvolvido por Barbosa e Ferry (2018) com o propósito de favorecer a construção e investigação das características estruturais de comparações. O mapeamento estrutural resultante desse processo é apresentado no Quadro 9.

Quadro 9: Mapeamento estrutural do protótipo digital do modelo analógico

Domínio representante (modelo)	Correspondências	Domínio representado (entidade de interesse científico)
Circuito Hidráulico	E_1 ↔	Circuito Elétrico

Água		Cargas elétricas
Reservatório em posição mais elevada		Terminal positivo da Bateria (Cátodo)
Reservatório no nível da base		Terminal negativo da bateria (Ânodo)
Conjunto dos 2 reservatórios hidráulicos		Bateria Elétrica
Válvula (torneira) X		Disjuntor (interruptor) X
Válvula (torneira) Y		Disjuntor (interruptor) Y
Tubulação Hidráulica		Fiação elétrica
Potencial Gravitacional		Potencial Elétrico
Controlador de fluxo X		Lâmpada (resistor) X
Controlador de fluxo Y		Lâmpada (resistor) Y
Controlador de fluxo Z		Lâmpada (resistor) Z
Bomba hidráulica		Não representa elemento algum do circuito elétrico
Não há elemento no modelo que representa esse separador		Separador interno entre os terminais da bateria
Não há elemento no modelo que representa esse separador		Eletrolito (p.ex.: alcalino) no interior da bateria
Não há elemento no modelo que representa essa capa isolante		A fiação elétrica comumente é envolta de uma capa isolante
Fluxo de água		Fluxo de cargas elétricas (ou corrente elétrica)
O fluxo de água no circuito hidráulico tem apenas o sentido de fluxo real		Nos circuitos elétricos há dois sentidos para corrente elétrica: o do fluxo real das cargas e o convencional
Diferença de potencial gravitacional		Diferença de potencial elétrico
Diâmetro da tubulação hidráulica		Diâmetro da fiação elétrica
A resistência hidráulica é uma propriedade do circuito hidráulico		A resistência elétrica é uma propriedade do circuito elétrico.
Possíveis ajustes do controlador de fluxo X		Possíveis valores de resistência elétrica da lâmpada X
Possíveis ajustes do controlador de fluxo Y		Possíveis valores de resistência elétrica da lâmpada Y

Possíveis ajustes do controlador de fluxo Z	$A_7(E_{12})$ ←→	Possíveis valores de resistência elétrica da lâmpada Z
Características físicas da tubulação	$A_8(E_8)$ ←→	Características físicas da fiação
Entre os dois reservatórios há uma diferença de potencial gravitacional	$r_1(E_3, E_4, A_2)$ ←→	Entre dois os terminais da bateria há uma diferença de potencial elétrico
Entre os dois reservatórios (E3 e E4) há uma bomba hidráulica (E13) responsável pela manutenção da diferença de potencial gravitacional (A2) praticamente constante entre eles. *Código da limitação no modelo: L5: [R ¹ (r ₁ , E ₁₃)]	L5: [R ¹ *] ←→ X	Entre o Cátodo (E3) e o Ânodo (E4) de uma bateria alcalina (E5), por exemplo, há um separador (E14) e um eletrólito alcalino (E15), que apesar de suas funções eletroquímicas, não mantém a diferença de potencial elétrico (A2) constante entre os terminais da bateria. Esta diferença decresce à medida que a bateria descarrega *Código da limitação no circuito elétrico: L5: [R ¹ (r ₁ , E ₁₄ , E ₁₅)]
O reservatório da posição mais elevada tem água a um potencial gravitacional maior do que o potencial da água do reservatório que está no nível do solo	$r'_1(E_3, E_4, A_2)$ ←→	O terminal positivo (cátodo) tem cargas elétricas a um potencial elétrico maior do que o potencial das cargas do terminal negativo (ânodo)
A diferença de potencial gravitacional entre os reservatórios (r ₁) é a responsável pelo fluxo de água no circuito (A ₁)	R2 (r ₁ , A ₁) ←→	A diferença de potencial elétrico entre os terminais da bateria (r ₁) é a responsável pelo fluxo de cargas elétricas no circuito (A ₁)
As torneiras (E ₆ e E ₇) podem cessar o fluxo de água (A ₁)	$r_2(E_6, E_7, A_1)$ ←→	Os interruptores (E ₆ e E ₇) podem cessar o fluxo de cargas elétricas (A ₁)
Para interromper o fluxo de água (A ₁), fecha-se a torneira (E ₆ , E ₇)	D2: [r ₂ (E ₆ , E ₇ , A ₁)] ←→ X	Para interromper a corrente elétrica (A ₁), abre-se o interruptor (E ₆ , E ₇)
Características físicas da tubulação (A ₈ ; p.ex.: diâmetro – A ₃) alteram a resistência hidráulica (A ₄) do circuito	$r_3(A_8, A_4)$ ←→	Características físicas da fiação (A ₈ ; p.ex.: diâmetro – A ₃) alteram a resistência elétrica (A ₄) do circuito
A inserção de controladores (E ₁₀ , E ₁₁ e E ₁₂) de fluxo no circuito aumenta a resistência hidráulica (A ₄) em cada trecho onde eles são inseridos, alterando a resistência hidráulica total	$r_4(E_{10}, E_{11}, E_{12}, A_4)$ ←→	A inserção de lâmpadas (E ₁₀ , E ₁₁ e E ₁₂) no circuito aumenta a resistência elétrica (A ₄) em cada trecho onde ele é inserido, alterando a resistência elétrica total
O circuito hidráulico (E ₁) está delimitado pela tubulação hidráulica (E ₈)	$r_5(E_1, E_8)$ ←→	O circuito elétrico (E ₁) está delimitado pela fiação elétrica (E ₈)
A água (E ₂) flui através da tubulação hidráulica (E ₈)	$r_6(E_2, E_8)$ ←→	As cargas elétricas (E ₂) fluem através da fiação elétrica (E ₈)
A água não é constituinte da tubulação hidráulica. A tubulação contém a água que passa por ela	D3: [r ₆ (E ₂ , E ₈)] ←→ X	As cargas elétricas são constituintes do próprio material da fiação elétrica
Uma maior resistência hidráulica (A ₄) do circuito resulta em um menor fluxo de água (A ₁)	$r_7(A_4, A_1)$ ←→	Uma maior resistência elétrica (A ₄) do circuito resulta em um menor fluxo de cargas elétricas (A ₁)

Se apenas a torneira X ou Y (E_6 ou E_7) estiver aberta, o fluxo de água (A_1) que passa pelos controladores de fluxo X ou Y (E_{10} ou E_{11}), respectivamente, e Z (E_{12}) terá o mesmo valor	$r_8 (E_6/E_7, A_1, E_{10}/E_{11}, E_{12})$ 	Se apenas a chave X ou Y (E_6 ou E_7) estiver fechada, a corrente elétrica (A_1) que passa pelas lâmpadas X ou Y (E_{10} ou E_{11}) e Z (E_{12}) terá o mesmo valor
Se as torneiras X (E_6) e Y (E_7) estiverem abertas, o fluxo de água (A_1) que passa pelo controlador de fluxo Z (E_{12}) será a soma dos fluxos que passam pelos controladores de fluxo X (E_{10}) e Y (E_{11})	$r_9 (E_6, E_7, A_1, E_{10}, E_{11})$ 	Se as chaves X (E_6) e Y (E_7) estiverem fechadas, a corrente elétrica (A_1) que passa pela lâmpada Z (E_{12}) será a soma das correntes que passam nas lâmpadas X (E_{10}) e Y (E_{11})
O sentido do fluxo de água (A_1) no circuito hidráulico será do reservatório de maior potencial gravitacional para o reservatório de menor potencial gravitacional – r'_1	$2R^3 (A_1, r'_1)$ 	O sentido convencional da corrente elétrica (A_1) no circuito elétrico será do terminal positivo, de maior potencial elétrico, para o terminal negativo, de menor potencial elétrico – r'_1
A resistência total do circuito (A_4) é menor com as 2 torneiras (E_6 e E_7) abertas do que com apenas 1 torneira aberta	$r_{10} (A_4, E_6, E_7)$ 	A resistência total do circuito (A_4) é menor com os 2 disjuntores (E_6 e E_7) ligados do que com apenas 1 disjuntor ligado
Sem a inserção do conjunto dos dois reservatórios (E_5) não haveria fluxo de água (A_1) no circuito hidráulico (E_1) apresentado	$r_{11} (E_1, E_5, A_1)$ 	Sem a inserção da bateria (E_5) não haveria fluxo de cargas (A_1) no circuito elétrico (E_1) apresentado
Os possíveis ajustes dos controladores de fluxo ($A_5/A_6/A_7$) alteram o fluxo de água (A_1) no circuito	$r_{12} (A_5/A_6/A_7, A_1)$ 	Possíveis valores de resistência elétrica da lâmpada ($A_5/A_6/A_7$) alteram o fluxo de cargas elétricas (A_1) no circuito
Uma maior diferença de potencial gravitacional entre os reservatórios (r_1) resulta em um maior fluxo de água (A_1) no circuito	$2R^4 (r_1, A_1)$ 	Uma maior diferença de potencial elétrico entre os terminais (r_1) resulta em uma maior corrente elétrica (A_1) no circuito
O fluxo de água (A_1) desse circuito simples depende de dois fatores: da diferença de potencial gravitacional entre os reservatórios (r_1) – R^2 , e da resistência hidráulica total (A_4)	$3R^5 (2R^2, A_4)$ 	O fluxo de cargas (A_1) desse circuito simples depende de dois fatores: da diferença de potencial elétrico entre os terminais (r_1) – R_2 , e resistência elétrica total (A_4)
O valor de fluxo de água (A_1) que passa pelo controlador de fluxo Z (E_{12}), em qualquer configuração de abertura das torneiras X (E_6) e Y (E_7), demonstra que não há consumo de água nos trechos anteriores do circuito	$r_{13} (A_1, E_{12}, E_6, E_7)$ 	O valor de fluxo de cargas elétricas (A_1) que passa pela lâmpada Z (E_{12}), em qualquer configuração de fechamento dos interruptores X (E_6) e Y (E_7), demonstra que não há consumo de carga elétrica nos trechos anteriores do circuito

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir do mapeamento estrutural do modelo do circuito elétrico baseado na analogia com o circuito hidráulico apresentado no Quadro 9, podemos observar que foi identificado um maior número de elementos, de atributos e de relações do que as quantidades levantadas nos livros didáticos, apresentadas nos Quadros 5, 6 e 7. No mapeamento, foram registradas correspondências de similaridade entre 12 elementos, 8 atributos e 17 relações em cada domínio da analogia que

fundamenta o modelo, sendo 4 dessas relações de ordem superior. Nos Quadros 5, 6 e 7 foram levantados apenas 6 elementos, 6 atributos e 7 relações. Podemos afirmar que esse maior número de correspondências mapeadas em relação à quantidade inicialmente levantada nos livros didáticos decorre da intencionalidade criativa e pedagógica envolvida no processo da prototipagem do modelo analógico. Embora as comparações encontradas nos livros didáticos tenham servido de base para o nosso protótipo, durante o processo de prototipagem dos modelos convencionais dos circuitos apresentados lado a lado na Figura 1 e, posteriormente, na prototipagem do modelo analógico apresentado na Figura 2, as escolhas feitas para inserção de elementos de ambos os domínios da analogia nessas representações se basearam em aspectos didáticos do próprio processo de modelagem e do estabelecimento dessa analogia. Intencionalmente, por exemplo, utilizou-se 2 válvulas e 2 disjuntores (E_3 e E_4) e ainda 3 controladores de fluxo e 3 lâmpadas (E_{10} , E_{11} e E_{12}) para evidenciarmos aspectos importantes dos circuitos em série e em paralelo. O uso de mais de um desses elementos já resulta em uma diferença entre o levantamento feito nas obras didáticas e o que foi mapeado.

Adicionalmente, vale ressaltar que todo esse processo de construção do modelo analógico, associado com a sua prototipagem digital, que envolve tomadas de decisão sobre os elementos, atributos e relações a serem representados no modelo, se configura como uma atividade dinâmica, iterativa e não linear, na qual as decisões e escolhas construtivas de uma etapa interferem nas outras. Portanto, consideramos que adaptações construtivas, intencionalidades pedagógicas e uma certa liberdade criativa são inerentes ao processo de prototipagem estabelecido. Ademais, o mapeamento estrutural do modelo analógico é intencionalmente feito de forma exaustiva, buscando mapear todos os elementos, atributos e relações relevantes, bem como as limitações e diferenças pertinentes à analogia em questão.

Esse mapeamento estrutural nos permitiu também deduzir a estrutura relacional do modelo analógico, a começar pela relação de maior ordem, que coincidiu como sendo a última relação de ordem superior mapeada: $3R^5$. Isso significa que a primeira expressão de concatenamento entre as relações similares colocadas em correspondência na analogia que fundamenta esse modelo é regida por uma relação de terceira ordem. A Figura 3 apresenta as três expressões de concatenamento que constituem a estrutura relacional do modelo analógico mapeado e os códigos dos predicados relacionais que apareceram isolados, isto é, que não se interconectam uma com as outras.

1ª expressão: ${}^3R_5 \{ {}^2R_2 [r_1 (E_3, E_4, A_2 (E_9)), A_1 (E_2)], A_4 (E_1) \}$ 2ª expressão: ${}^2R_4 \{ r_1 [E_3, E_4, A_2 (E_9)], A_1 (E_2) \}$ 3ª expressão: ${}^2R_3 [A_1 (E_2), r'_1 (E_3, E_4, A_2 (E_9))]$ Relações de primeira ordem isoladas: $r_{13}, r_{12}, r_{11}, r_{10}, r_9, r_8, r_7, r_6, r_5, r_4, r_3$ e r_2
--

Figura 3: Estrutura relacional do modelo analógico

Fonte: Elaborado pelos autores.

De acordo com as expressões apresentadas na Figura 3, na estrutura relacional do modelo analógico em questão podemos encontrar três conjuntos de relações interconectadas: o primeiro se constitui pelas relações r_1 e R^2 regidas pela relação R^5 ; o segundo envolve a relação r_1 regida pela R^4 ; e o terceiro também envolve a relação r_1 regida, no entanto, pela relação R^3 . A presença da relação de primeira ordem r_1 nas três expressões de concatenamento que constituem a estrutura relacional deduzida evidencia a sua centralidade e relevância na configuração do modelo do circuito elétrico, concebido a partir da analogia com o circuito hidráulico. A partir de tal constatação, podemos dizer que a compreensão da existência de uma diferença de potencial elétrico entre os dois terminais da bateria (r_1 no domínio alvo), em similaridade com a existência

de uma diferença de potencial gravitacional entre os dois reservatórios posicionados a diferentes alturas, se constitui como a relação fundamental para a construção de significados e atribuição de sentidos no interior das outras relações de ordem superior representadas no modelo. A centralidade de r_1 na estrutura relacional desse modelo analógico também revela a importância dos seus elementos e atributos constituintes: E_3 e E_4 , os dois reservatórios e os dois terminais; e E_9 , os potenciais gravitacional e elétrico, bem como as diferenças em cada caso, codificadas como A_2 . Além desses elementos e atributos que compõem a relação r_1 , presentes nas três expressões de concatenamento, destacam-se como parte constituinte dessas expressões na estrutura relacional o atributo A_1 de E_2 , que trata dos fluxos de água e de cargas elétricas, e o atributo A_4 de E_1 , que se refere às resistências dos circuitos hidráulico e elétrico.

Os outros elementos (E_5 , E_6 , E_7 , E_8 , E_{10} , E_{11} e E_{12}) fazem parte da estrutura relacional do modelo analógico como argumentos das relações de primeira ordem que não aparecem dentro das três expressões de concatenamento. Isso significa que todos esses elementos são itens relevantes para a constituição do modelo analógico do circuito em questão, embora apareçam dentro de predicados relacionais isolados. O mesmo ocorre com os atributos A_5 , A_6 , A_7 e A_8 , que tratam de possíveis ajustes no circuito modelado (valores de resistência elétrica em similaridade com ajustes nos controladores de fluxo) e de características físicas da fiação elétrica em similaridade às características físicas da tubulação.

Por meio da dedução dessa estrutura relacional comum, também foi possível identificar um atributo inicialmente mapeado e aparentemente relevante que não faz parte dela: o atributo A_3 , que trata do diâmetro da fiação elétrica em similaridade com o diâmetro da tubulação hidráulica. Vimos que esse atributo se constitui, na verdade, como uma possível manifestação da correspondência codificada como A_8 , as características físicas da fiação em similaridade com as características físicas da tubulação. Isso significa que esse atributo, o diâmetro, é um predicado descritivo pouco relevante tanto para o processo de construção desse modelo quanto para a abordagem da analogia que o fundamenta.

Essa estrutura relacional, além de elucidar o modo como todas as relações do circuito elétrico que encontram relações similares no circuito hidráulico estão (ou não) interconectadas, também revela outros aspectos do modelo analógico: (1º) o foco relacional, evidenciado pelo alto número de relações, mesmo tendo um grande número de elementos e atributos similares, uma vez que a maior parte deles está presente no interior dessas relações; isso significa que a modelagem analógica de um circuito elétrico em correspondência com um circuito hidráulico supera a similaridade de mera aparência entre os dois domínios; e (2º) a sistematicidade relativamente alta, evidenciada pela interconectividade parcial das relações mapeadas por meio das três expressões de concatenamento regidas pelas relações de ordem superior $3R^5$, $2R^4$ e $2R^3$, apesar da existência de 12 relações de primeira ordem que aparecem como predicados relacionais isolados.

Retomando o Quadro 9, o mapeamento estrutural revela a consistência estrutural do modelo analógico evidenciada pela correspondência um a um entre os 12 elementos e 8 atributos identificados, de modo que cada um dos elementos e cada um desses predicados do domínio representante corresponde a apenas um elemento ou predicado do domínio representado, além da conectividade em paralelo entre as relações similares colocadas em correspondência. Por exemplo, na correspondência relacional codificada como r_7 , em que uma maior resistência elétrica do circuito resulta em um menor fluxo de cargas elétricas, é possível perceber uma conectividade em paralelo com os argumentos da relação que trata da maior resistência do circuito hidráulico que resulta em um menor fluxo de água.

Além das similaridades, também foram identificadas 5 limitações (L_1 , L_2 , L_3 , L_4 e L_5) e 3 diferenças alinháveis (D_1 , D_2 e D_3). Sobre as quatro limitações, enquanto L_1 trata de um elemento (a bomba hidráulica) presente no modelo que não representa analogicamente qualquer elemento

de um circuito elétrico, L_2 e L_3 se referem a elementos presentes nas baterias dos circuitos elétricos não representados por meio do modelo analógico – o separador interno entre os terminais da bateria e o seu eletrólito e L_4 refere-se à capa isolante que comumente cobre uma fiação elétrica e, também, não há correspondência no modelo analógico. Já L_5 se configura como uma diferença não alinhável entre os domínios da analogia que fundamenta o modelo: no circuito hidráulico, a bomba (E_{13}) inserida entre os dois reservatórios tem a função de manter a diferença de potencial gravitacional praticamente constante entre eles. No entanto, no circuito elétrico, uma bateria alcalina, por exemplo, não desempenha esse mesmo papel, o de manter a diferença de potencial elétrico constante entre os terminais. A presença do separador (E_{14}) entre os terminais e o eletrólito (E_{15}) apenas garante o adequado funcionamento da bateria, mas não mantém constante a diferença de potencial, pois essa diferença de potencial elétrico diminui à medida que a bateria descarrega.

Sobre as diferenças alinháveis, a D_1 aborda um conceito importante para o ensino da Eletrodinâmica: a diferença entre corrente elétrica convencional e corrente elétrica real. A primeira é uma convenção adotada historicamente que assume que a corrente elétrica flui, no caso de uma bateria, do polo positivo (terminal com maior potencial elétrico) para o polo negativo (terminal com menor potencial elétrico). A corrente elétrica real, por outro lado, considera o movimento real dos elétrons: nos condutores elétricos sólidos, havendo uma diferença de potencial elétrico entre os terminais das baterias, os elétrons livres se deslocam do polo negativo (ânodo) para o polo positivo (cátodo), isto é, no sentido oposto ao da corrente convencional. Como essa particularidade dos circuitos elétricos não encontra similaridade com os circuitos hidráulicos, mas está associada com os fluxos de água e de cargas elétricas, classificamos esse atributo como uma diferença alinhável entre o domínio alvo (domínio representado) e o domínio base da analogia que fundamenta o modelo. Ressaltamos ainda que o mapeamento foi realizado considerando a corrente elétrica no sentido convencional. Isso pode ser visto na relação R^3 , que trata do sentido convencional da corrente elétrica, do terminal positivo (maior potencial elétrico) para o terminal negativo (menor potencial elétrico), em similaridade com o sentido do fluxo de água a partir do reservatório de maior potencial gravitacional para o de menor potencial gravitacional.

Por fim, as diferenças alinháveis D_2 e D_3 tratam de situações importantes de se destacar na representação dos circuitos elétricos a partir da analogia com os circuitos hidráulicos: D_2 se refere à interrupção do funcionamento dos circuitos elétricos por meio da abertura de um disjuntor, contrariamente ao que se opera em um circuito hidráulico, em que a interrupção se dá por meio do fechamento de uma válvula. Enfatizar essa diferença é importante para que o estudante não transfira, erroneamente, ideias de um domínio ao outro, como no caso da oposição dos verbos “abrir” e “fechar”. Já em D_3 , a diferença se refere à natureza da relação r_6 , ora entre a fiação metálica e os elétrons, ora entre a tubulação e a água que passa dentro dela: no primeiro caso há uma relação de constituição, pois os elétrons fazem parte da fiação metálica; no segundo caso, a água não faz parte da tubulação. Trata-se de uma relação de contenção entre a tubulação e a água, diferentemente da relação de constituição entre a fiação metálica e as cargas elétricas. Importante ressaltar que poderia haver uma relação de contenção entre a capa isolante e a fiação elétrica, mas como explícito pela limitação L_5 , não há correspondência entre essa capa isolante com nenhum elemento no modelo analógico e não podemos relacionar esse isolante à tubulação hidráulica.

Adicionalmente, vale ressaltar que todo esse processo de construção do modelo analógico, associado com a sua prototipagem digital, que envolve tomadas de decisão sobre os elementos, atributos e relações a serem representados no modelo, se configura como uma atividade dinâmica, iterativa e não linear, na qual as decisões e escolhas construtivas de uma etapa interferem nas outras. Portanto, consideramos que adaptações construtivas, intencionalidades pedagógicas e uma certa liberdade criativa são inerentes ao processo de prototipagem estabelecido. Ademais, o mapeamento estrutural do modelo analógico é intencionalmente feito de forma exaustiva,

buscando mapear todos os elementos, atributos e relações relevantes, bem como as limitações e diferenças pertinentes à analogia em questão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permite concluir que modelos analógicos, como o que foi construído e analisado neste trabalho, considerando as etapas propostas de sua prototipagem digital, emergem como uma ferramenta de relevância para o ensino de conceitos e sistemas de interesse científico, como os circuitos elétricos.

Comparações analógicas envolvendo circuitos elétricos e outros domínios, como o hidráulico, podem favorecer o compartilhamento de significados e a atribuição de sentidos em torno dos conceitos de interesse da Eletrodinâmica, estimulando a compreensão conceitual, a memorização dos componentes dos circuitos elétricos por associação com os circuitos hidráulicos, a compreensão das relações entre os elementos dos circuitos elétricos e seus atributos por similaridade às relações encontradas nos circuitos hidráulicos e, conseqüentemente, a aprendizagem em Física, ao mesmo tempo em que fomenta a exploração e a experimentação prática. O mapeamento estrutural realizado ressalta diversos aspectos desse potencial analógico do modelo prototipado. Ao longo da discussão feita neste trabalho, identificamos e discorremos sobre alguns deles, como a centralidade pragmática da relação r_1 , demonstrada pelas expressões de concatenamento da estrutura relacional comum entre os dois domínios envolvidos. Essa centralidade nos diz que a correspondência da relação entre a diferença de potencial gravitacional, existente entre os reservatórios de água, e a diferença de potencial elétrico, existente entre os terminais de uma bateria, desempenha um papel fundamental na compreensão dos demais conceitos e relações representadas. Ao reforçar a importância de r_1 , ressalta-se não apenas a sua centralidade pragmática, mas também o seu impacto sobre a compreensão das outras relações que constituem o modelo, o que evidencia a sua sistematicidade.

Ademais, as etapas realizadas para a construção do protótipo digital do modelo analógico de um circuito elétrico fundamentado na comparação com um circuito hidráulico, para o ensino da Eletrodinâmica, nos permitiram elaborar respostas às três questões de pesquisa apresentadas na introdução deste artigo, a saber: 1) Quais são os elementos, atributos e relações pertinentes à construção de um modelo analógico de um circuito elétrico, tendo um circuito hidráulico como domínio base, para o ensino de conceitos básicos da Eletrodinâmica?; 2) Como as correspondências de similaridades levantadas na comparação entre o circuito hidráulico e o elétrico podem ser reunidas e representadas em um mesmo modelo analógico?, e 3) Como se caracteriza o modelo analógico à luz da TME, originalmente proposta para análise de analogias?

Em relação à primeira questão, consideramos que os livros didáticos analisados se constituíram como fontes adequadas para identificação de uma quantidade significativa de elementos e predicados pedagogicamente relevantes para a construção do modelo analógico prototipado. Embora soubéssemos, no caso da temática dos circuitos elétrico e hidráulico, da existência de diversos outros elementos, atributos e relações possíveis de serem utilizados na construção de boas analogias, a seleção por meio de livros didáticos se mostrou como uma fonte fundamentada e objetiva. Tínhamos como pressuposto de que o levantamento feito a partir de analogias indicadas por professores poderia resultar em um trabalho mais rico, porém mais extenso, trabalhoso e demasiadamente complexo em relação ao levantamento feito nos livros. Desse modo, a partir do levantamento feito nessas fontes, chegamos a uma quantidade de 6 elementos, 6 atributos e 7 relações relevantes, que podem ser vistos nos Quadros 5, 6 e 7 apresentados na seção dos resultados.

A segunda questão foi respondida quando os elementos e predicados obtidos no levantamento feito nos livros didáticos foram confrontados com o modelo analógico prototipado (Figura 2) e com o seu mapeamento estrutural. Por meio das imagens do modelo nessas figuras,

foi possível analisar como as correspondências entre os elementos e atributos puderam ser reunidos na representação, em analogia ao circuito hidráulico. Por meio do mapeamento estrutural do modelo, foi possível fazer a análise do modo como as relações similares podem ser exploradas nessa representação, também em analogia ao circuito hidráulico. Nessa análise, consideramos que uma das 7 relações identificadas nos livros não deveria ser explorada no modelo analógico. Alternativamente, julgamos como mais adequado abordar a questão das resistências dos circuitos focando na relação entre os elementos resistivos dos circuitos e os fluxos (água/cargas elétricas), como pode ser visto na correspondência codificada como r4.

Quanto à questão sobre a caracterização do modelo analógico à luz da TME, a partir do mapeamento estrutural do seu protótipo, concluímos que, assim como a analogia que o fundamenta, esse modelo: 1º) é estruturalmente consistente, em decorrência das correspondências um a um e das conectividades em paralelo entre os argumentos das relações mapeadas; 2º) apresenta o devido foco relacional, capaz de desencadear um raciocínio tipicamente analógico, segundo a TME; e 3º) é relativamente sistemático, em decorrência da centralidade da relação r_1 no interior de três relações de ordem superior identificadas, conforme toda a discussão feita na seção de resultados.

A partir dessas respostas, acreditamos que este trabalho oferece contribuições relevantes para o aprimoramento de práticas de ensino em Física fundamentadas em modelos, em analogias e, conseqüentemente, em modelos analógicos. Consideramos, a partir de nossa análise, que os modelos analógicos podem ser recursos mediadores de grande valor e parte importante de estratégias pedagógicas para aprendizagem de conteúdos que exigem alto grau de abstração em sua compreensão, como é o caso do estudo da Eletrodinâmica. Esperamos ainda, com este trabalho, ter contribuído na proposição de etapas que possam sistematizar a construção de modelos analógicos para o ensino de Ciências. Recomendamos que futuros estudos investiguem as percepções de professores e estudantes quanto ao uso do modelo analógico aqui proposto, tanto em sua versão materializada quanto no formato digital.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Délcio.; ALMEIDA, Rangel; FERRY, Alexandre. MAES-3DMF: mapeamento estrutural de um Modelo Analógico do Espaço Sideral 3D em Meio Fluido para o Ensino de Ciências. **Latin American Journal of Science Education**, v. 5, n. 22004, 2018.

BARBOSA, Wilbert FERRY, Alexandre. Concepção de um software para mapeamento estrutural de analogias empregadas no ensino de ciências. **Educitec, Manaus**, v. 4, n. 8, p. 224 - 243, 2018.

BROWN, Simon; SALTER, Susan. Analogies in science and science teaching. **Advances in Physiology Education**, v. 34, n. 4, p. 167-169, 2010. Disponível em: <https://journals.physiology.org/doi/epdf/10.1152/advan.00022.2010>. Acesso em: 20 Mar. 2024.

CLEMENT, John J. (Ed.). **Creative model construction in scientists and students**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008.

FERRY, A. S. **Análise estrutural e multimodal de analogias em uma sala de aula de química**. 2016. 170 f. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016.

FOTOU, Nikolaos; ABRAHAM, Ian. Extending the role of analogies in the teaching of physics. **The Physics Teacher**, v. 58, n. 1, p. 32-34, 2020.

GENTNER, Dedre; GENTNER, Donald R. Flowing waters or teeming crowds: Mental models of electricity. **Mental models**, v. 99, p. 129, 1983.

GENTNER, Dedre. Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. **Cognitive science**, v. 7, n. 2, p. 155-170, 1983.

GENTNER, Dedre; MARKMAN, Arthur B. Structure mapping in analogy and similarity. **American psychologist**, v. 52, n. 1, p. 45, 1997.

GILBERT, John; JUSTI, Rosária. **Modelling-based teaching in science education**. Cham, witzerland: Springer International Publishing, v. 9, 2016.

HOLYOAK, Keith; THAGARD, Paul. Analogical mapping by constraint satisfaction. *Cognitive science*, v. 13, n. 3, p. 295-355, 1989.

KNUUTTILA, Tarja *et al.* **Models as epistemic artefacts: Toward a non-representationalist account of scientific representation**. 2005. Tese de Doutorado. Helsingin yliopisto.

MOZZER, Nilmara; JUSTI, Rosária. Modelagem analógica no ensino de ciências. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 23, n. 1, p. 155-182, 2018.

NERSESSIAN, Nancy J. Model-based reasoning in conceptual change. In: **Model-based reasoning in scientific discovery**. Boston, MA: Springer US, p. 5-22, 1999.

SCHWEDES, Hannelore; DUDECK, Wolff-Gerhard. Teaching electricity by help of a water analogy (how to cope with the need for conceptual change). In: **Research in science education in Europe**. Routledge, p. 49-60, 1996.

TABER, Keith S.; DE TRAFFORD, Tom; QUAIL, Teresa. Conceptual resources for constructing the concepts of electricity: the role of models, analogies and imagination. **Physics Education**, v. 41, n. 2, p. 155, 2006.

TESFAYE, Casey Langer; WHITE, Susan. High School Physics Textbooks, Resources and Teacher Resourcefulness: Results from the 2012-13 Nationwide Survey of High School Physics Teachers. Focus On. **Statistical Research Center of the American Institute of Physics**, 2014. Disponível em: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED547650.pdf>. Acesso em: 20 Mar. 2024.

UGUR, Gokhan et al. The effects of analogy on students' understanding of direct current circuits and attitudes towards physics lessons. **European journal of educational research**, v. 1, n. 3, p. 211-223, 2012. Disponível em: https://pdf.eu-jer.com/EU-JER_1_3_211_Ugur_Etal.pdf. Acesso em: 20 Mar. 2024.