

## ANÁLOGOS PARA RESISTÊNCIA E RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho<sup>1</sup>, Luiz Vitória Fernandes da Silva<sup>1</sup>, Álvaro José Magalhães Neves<sup>1</sup> e Regina Simplício Carvalho<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física/ Universidade Federal de Viçosa - MG, atadeu@ufv.br

<sup>2</sup> Departamento de Química/ Universidade Federal de Viçosa - MG

### Resumo

*As analogias envolvem a comparação entre similaridades presentes em domínios de conhecimento diferentes, um conhecido e outro desconhecido, e pode constituir-se em um método eficaz no ensino da Física, tornando conceitos abstratos compreensíveis e críveis. No presente trabalho investigamos a utilização dos análogos hidráulico, mecânico, de movimento de multidões e de crianças para o ensino dos conceitos associados aos circuitos elétricos. Os relatos de aplicações sugerem que estas analogias oferecem significado aos conceitos de corrente elétrica, diferença de potencial, gerador, resistência elétrica e destes dois últimos elementos ligados em série e paralelo, com exceção da analogia de multidões que não apresenta análogo para a função de gerador. A estrutura construtiva do análogo mecânico evidencia o caráter não localizado da resistência e da resistividade elétrica nos condutores, diferente das demais analogias, que sugerem localização da resistência elétrica em uma parte do condutor, imagem que acaba por ser reforçada pela utilização da representação esquemática dos circuitos elétricos. O arranjo também oportuniza discussões em torno da quantização da carga e da conservação desta.*

Palavras-chave: Analogia, Circuitos, Resistividade, Resistência

### Introdução

Analogias são de uso comum em nosso cotidiano, estão presentes em ditos populares, na literatura, na pregação religiosa e no discurso científico, sendo há muito reconhecidas como uma útil ferramenta no ensino de ciências. As analogias envolvem a comparação entre similaridades presentes em domínios de conhecimento diferentes, um conhecido e outro desconhecido. Além das semelhanças entre domínios, é necessário que uma relação estrutural existente num domínio possa também ser aplicada no outro domínio. Esta relação induz um modo de raciocínio para compreensão dos fenômenos desconhecidos, idêntico ao utilizado nos domínios conhecidos [1]. Assim novos conhecimentos podem ser adquiridos com base em informações anteriormente armazenadas, constituindo-se em um método eficaz no ensino de ciências, tornando conceitos abstratos compreensíveis e críveis. As analogias ajudam os alunos a construir seu próprio conhecimento em um processo consistente com uma visão construtivista da aprendizagem. À medida que os alunos se desenvolvem cognitivamente e aprendem mais ciência, eles evoluem além dessas analogias, desenvolvendo modelos mentais mais sofisticados e abrangentes [2].

A apropriação de conhecimento que as analogias propiciam é frequentemente acompanhada por concepções alternativas, fato que impõe limitações do seu uso no ensino das ciências [3]. Os alunos usam seus conhecimentos, experiências e preferências passadas para interpretar as analogias tentando harmonizá-las à sua concepção de mundo. Dificuldades surgem quando o aluno desconhece aquilo que seria o domínio conhecido, quando os alunos atribuem

relações diferentes daquelas que o professor intenta ou quando não percebem onde a analogia se desfaz [4].

A literatura reporta, desde início do século vinte [5], o emprego de analogias simples e diretas entre circuitos elétricos e circuitos hidráulicos. As analogias entre corrente elétrica e fluxo de fluido (vazão), diferença de potencial e diferença de pressão são intuitivas e podem ser aplicadas diretamente, entretanto a construção de analogias para o conceito de resistividade e resistência não apresenta sucesso equivalente.

Neste trabalho, primeiramente discutiremos a estrutura relacional entre os circuitos elétricos e hidráulicos. Em seguida comparemos a analogia hidráulica com outras analogias para a eletricidade, quais sejam: o modelo da multidão em movimento e o análogo mecânico. Os dois últimos modelos oferecem um análogo aos centros espalhadores que caracterizam a resistividade elétrica.

Propomos um alargamento do campo de emprego do análogo mecânico suscitando sua utilização na discussão da associação de geradores e de resistores bem como da conservação e quantização da carga. O uso das analogias em sala de aulas tenciona melhorar a aprendizagem de conceitos; portanto, melhorar a maneira como as analogias são construídas e empregadas no ensino de ciências tem importantes consequências no ensino e na aprendizagem.

### **Circuitos elétricos e hidráulicos**

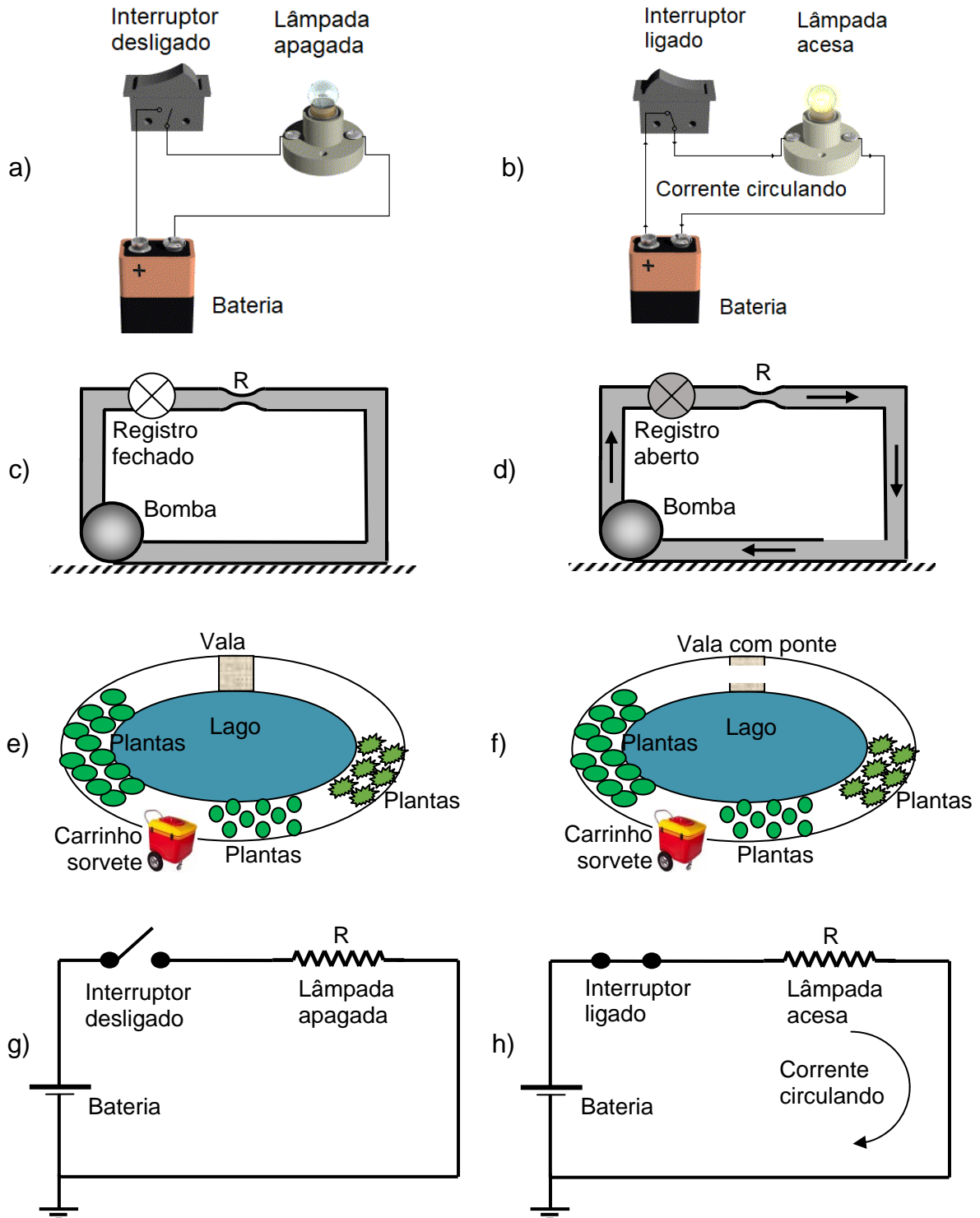
A analogia mais usada para explicar a eletricidade é a analogia com o fluxo de água em encanamentos, bombas, reservatórios e registros compondo circuitos hidráulicos [1], representada na figura 1, (c) e (d).

O circuito hidráulico é constituído por um encanamento preenchido com um líquido viscoso conectado a uma bomba capaz de bombear o líquido desde um nível na superfície da Terra até um nível mais elevado, estabelecendo uma diferença de pressão entre seus terminais, análogo à ação da bateria, que mantém uma diferença de potencial entre seus terminais. O análogo ao interruptor elétrico é um registro de vazão inserido no encanamento, que é capaz de permitir ou interromper a passagem do líquido, estabelecendo ou não uma corrente de fluido. No transiente que segue o ato de ligar, o circuito hidráulico fechado responde de forma similar ao circuito elétrico, fato que não ocorre no circuito hidráulico aberto, no qual é necessário um intervalo de tempo para o fluido preencher todas as partes do circuito.

No circuito hidráulico a função análoga ao fio terra no circuito elétrico pode, em muitos aspectos, ser representada por um grande reservatório subterrâneo, ligado ao circuito e completamente cheio de fluido. Uma vez que o encanamento do circuito está preenchido com o fluido, a bomba pode fazer circular o fluido sem extrair qualquer porção deste do reservatório e, caso o reservatório fosse removido, não acarretaria qualquer efeito na vazão de fluido que percorre o circuito. O reservatório fornece uma referência de pressão, mas não é uma parte funcional do circuito. De forma análoga, a bateria pode fazer circular a corrente elétrica sem o fio terra; este fornece ao circuito uma voltagem de referência. Além disso, o fio terra protege o circuito contra interferência elétrica externa.

Um circuito elétrico é constituído por um conjunto de componentes elétricos ligados por condutores elétricos de forma a possibilitar o estabelecimento de uma corrente elétrica através deles. Na figura 1 estão representados artisticamente, (a) e

(b), e esquematicamente, (g) e (h), uma bateria ligada a um interruptor e a uma lâmpada ou resistência. Quando o interruptor é fechado, se estabelece um fluxo de cargas elétricas, ou seja, uma corrente elétrica, de forma análoga à corrente de líquido no circuito hidráulico fechado.



**Figura 1:** Representação artística de um circuito elétrico a) desligado e b) ligado; esquema de circuito hidráulico c) sem vazão e d) com vazão; modelo de circuito para movimento de crianças em um pátio escolar e) desligado e f) ligado; esquema de circuito elétrico g) desligado e h) ligado.

O análogo hidráulico à resistência elétrica é uma constrição no encanamento. Uma constrição em um encanamento cilíndrico produz, segundo a lei de Poiseuille [6], uma redução na vazão de um fluido viscoso em proporção direta à quarta potência do raio do tubo e à diferença de pressão a que está submetido, e, em proporção inversa, varia com a viscosidade do fluido e o comprimento do encanamento. Assim uma constrição no encanamento resulta na redução da vazão, impondo maior resistência à passagem do fluido. Efeito similar é experimentado quando uma pessoa tenta sorver uma bebida muito viscosa, como o milk-shake, usando canudo de pequeno diâmetro e constata que é uma tarefa mais difícil do que quando executada usando um canudo de maior diâmetro. Ou seja, mantida a diferença de pressão a que está submetida a região do circuito hidráulico onde há uma constrição, quanto mais severa a constrição, menor a vazão; efeito análogo ao aumento da resistência em um circuito elétrico, que acarreta redução na corrente elétrica. Assim o análogo hidráulico satisfaz a lei de Ohm.

Resistores em série corresponderiam a constrições múltiplas em série, resistores em paralelo corresponderiam a constrições múltiplas em paralelo. Geradores ou baterias em paralelo corresponderiam a bombas em paralelo; cada bomba eleva a pressão de um mesmo valor, ficando o circuito sujeito à mesma diferença de pressão produzida por uma única bomba. Bombas em série representam a analogia para geradores em série, cada uma eleva a pressão de uma mesma quantidade, ficando o circuito sujeito ao dobro da diferença de pressão.

### **A representação da resistência**

A resistência ao fluxo de fluido, representada por uma constrição no encanamento do circuito hidráulico, produz um efeito resistivo localizado a uma dada região do circuito. Mesmo caráter de localização da resistência está expresso na representação artística da lâmpada, ligada por fios à bateria, e no esquema elétrico do circuito. A região da constrição terá maior resistência do que o restante do encanamento que compõe o circuito. Da mesma forma, um resistor em um circuito elétrico geralmente terá mais resistência do que o fio que o liga à bateria no circuito, entretanto o fio também possui resistência, distribuída ao longo de todo seu comprimento, e pode ser muito significativa como ocorre com as linhas de transmissão de energia. Assim a ideia de localização da resistência, expressa pela constrição no circuito hidráulico e pelo resistor no esquema do circuito elétrico, não está em acordo com o fato experimental de que a resistência elétrica está distribuída ao longo de todo condutor. O análogo hidráulico não oferece significado para a resistividade.

Estas representações, além de não evidenciarem o caráter não localizado da resistência e da resistividade elétrica, não estabelecem conexão destas grandezas com a distribuição de centros espalhadores no volume dos condutores e destes com o efeito Joule. Segundo o modelo de Drude, para o transporte de carga em sólidos condutores, para uma dada diferença de potencial aplicada a um condutor, são os espalhamentos sofridos pelos elétrons livres ao se propagarem ao longo do condutor que transformam parte da energia cinética destes em energia térmica [7], fenômeno manifesto pelo efeito Joule. É este contexto que permite se estabelecer uma similaridade [8] entre a resistência elétrica e a resistência hidráulica (constrição). Num condutor, os elétrons livres, apesar de sujeitos a uma força elétrica devido ao campo elétrico (ou diferença de potencial), apresentam uma velocidade média

constante, corrente constante, decorrente de múltiplos espalhamentos. A velocidade dos elétrons alcança um estado estacionário, na qual, em média, a energia cinética que as cargas ganham quando são aceleradas pela ação do campo elétrico é exatamente igual à energia que elas perdem em decorrência das colisões.

Este comportamento é similar ao escoamento estacionário de um fluido viscoso sujeito a uma diferença de pressão, ou seja, o fluido tem vazão constante, apesar de submetido a uma diferença de pressão, entretanto o mecanismo responsável é diferente do caso elétrico. Para um dado valor de velocidade, cada porção do fluido fica sujeita a uma força de atrito viscoso, de mesma magnitude e oposta à força resultante da diferença de pressão, e alcança uma velocidade terminal, ou uma vazão constante.

### **O análogo da multidão em movimento**

Além do análogo hidráulico, outra analogia para a eletricidade reportada na literatura é da multidão de pessoas em movimento. Nessa analogia, a corrente elétrica é vista como uma multidão que está obrigada a passar por um portão [1]. O portão é o análogo à resistência elétrica e a força com que as pessoas se empurram é o análogo à diferença de potencial aplicada. Esta analogia exibe uma grave limitação por não apresentar análogo para a função do gerador, elemento de circuito fundamental à manutenção do movimento dirigido dos elétrons.

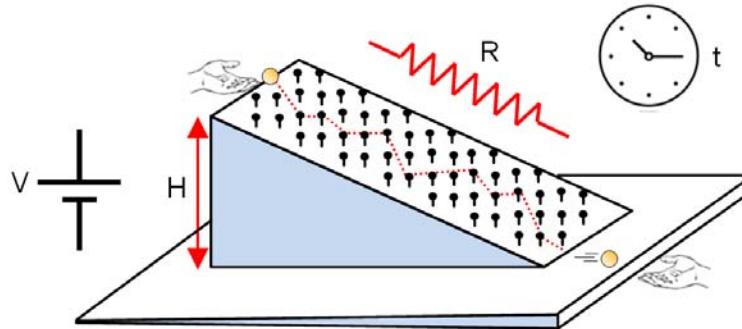
Mais recentemente foi publicado um trabalho [9] dando conta de uma analogia que também envolve multidão de pessoas, denominada “Comportamento de crianças em um pátio escolar diante da possibilidade de ganhar um sorvete”. Faz-se analogia entre o comportamento de crianças brincando em um pátio de escola e o modelo de elétrons livres em metais de Drude. O pátio tem um lago no meio, conforme representado na figura 1, (e) e (f), e as crianças tem sua movimentação sujeitas a diferentes condições, regras e estímulos. Um carrinho de sorvete é a fonte de estímulo para movimentação das crianças, análogo à bateria, a taxa com que as crianças se movem é o análogo à corrente. Sendo as crianças o análogo aos elétrons e as plantas o análogo aos centros espalhadores. Uma vala representa um interruptor aberto e quando esta é recoberta por uma ponte, um interruptor fechado.

O acúmulo de crianças ou de espaços vazios em qualquer parte do pátio da escola são proibidos. As crianças devem aproximar-se do carro de sorvete de um lado só, o “local de atendimento”, e eles sabem como o carro geralmente está estacionado; o movimento orientado das crianças ao redor do pátio da escola deve ser no sentido anti-horário. Cada criança recebe apenas um sorvete toda vez que encontra o sorveteiro. Tendo recebido um sorvete, cada criança deve continuar andando pelo pátio da escola e, depois de uma volta completa, a mesma criança pode pegar um segundo sorvete. O movimento em meio às plantas oferece significado à resistividade elétrica, quanto mais próximas estão as plantas, mais lento será o movimento, representando maior número de espalhamentos.

A aplicação desta analogia em sala mostrou que os alunos alcançaram a compreensão de conceitos associados aos fenômenos elétricos, tais como, corrente elétrica, geradores, diferença de potencial, transferência de energia, circuitos abertos e fechados, resistências e suas combinações em série e paralelo.

## O análogo mecânico para a Lei de Ohm

O análogo mecânico para a lei de Ohm [10,11,12] é aquele em que uma esfera se desloca, sob a influência do campo gravitacional, em uma trajetória permeada de obstáculos de modo que a esfera sofre inúmeras colisões. Tal sistema pode ser materializado por um plano inclinado no qual foram cravados pregos dispostos em igual espaçamento, simulando uma rede cristalina. Uma esfera é liberada da parte superior do plano e seu movimento é o análogo ao movimento dos elétrons em uma rede cristalina, conforme representado na figura 2.



**Figura 2** - Plano inclinado cravejado de pregos simulando uma rede cristalina. A altura  $H$  do plano é o equivalente à diferença de potencial,  $V$ , e o inverso do tempo,  $1/t$ , de queda é o equivalente à corrente,  $I$ .

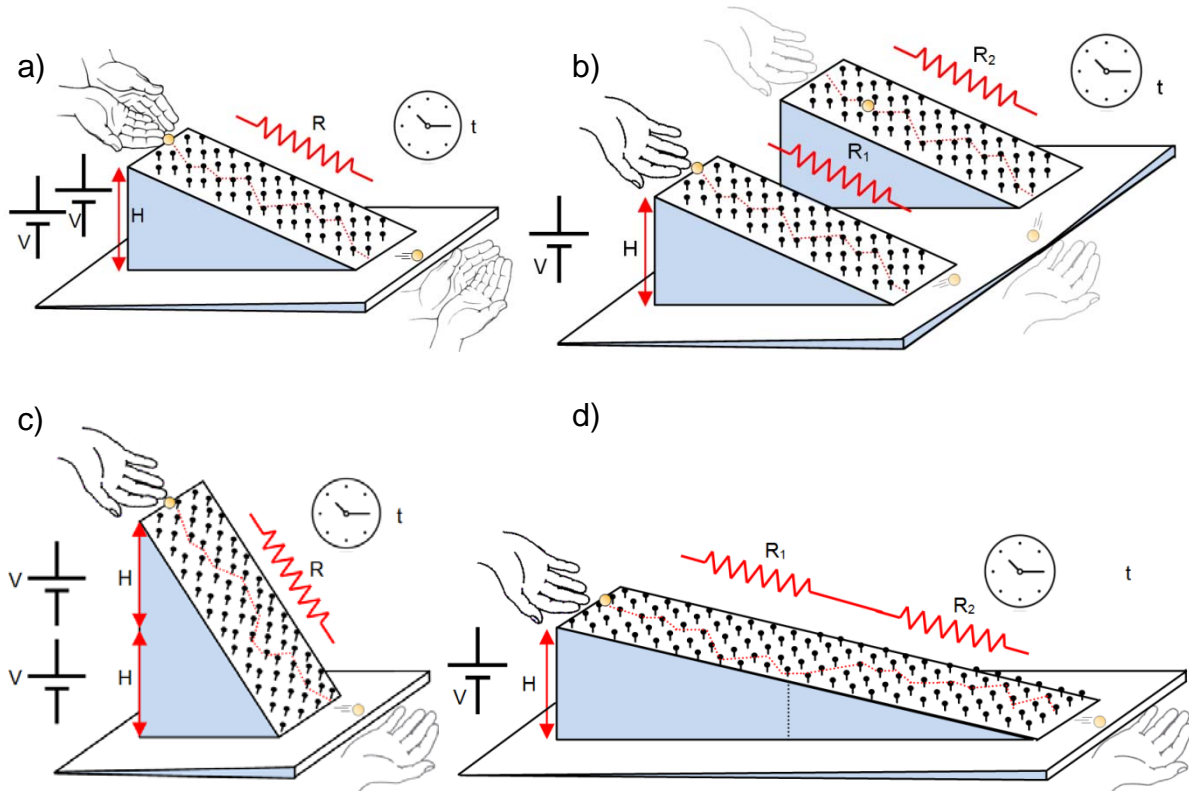
A altura  $H$ , de queda da esfera, é o análogo à diferença de potencial,  $V$ , e a intensidade da corrente elétrica,  $I$ , é análoga ao inverso do tempo de queda,  $1/t$ . Há uma relação de proporção direta entre  $H$  e  $1/t$ , análogo a lei de Ohm. Em consonância com o modelo de Drude (aproximação elétron livre e independente), o arranjo não possibilita interações entre esferas, mas possibilita colisões entre a esfera e os obstáculos, pregos, análogo ao espalhamento dos elétrons pelos centros espalhadores. Todavia, no análogo, as colisões são parcialmente inelásticas, diferentemente do modelo de Drude, e a velocidade da esfera imediatamente após a colisão não é aleatória.

Resultados da aplicação do análogo mecânico em sala de aula revelaram [13,14] trata-se de um material potencialmente significativo e que auxiliou os alunos a compor um modelo representativo da teoria microscópica da condução elétrica em metais.

Entendemos que este modelo se presta também a representar a associação de geradores e de resistores, figura 3. O arranjo de dois geradores em série encontra correspondência quando a altura  $H$  é dobrada, sem o comprimento da rampa inalterado. Dois geradores em paralelo corresponderiam a um arranjo em que duas mãos em concha elevando uma esfera até a altura  $H$ . Duas resistências em série corresponderiam em dobrar o comprimento do plano inclinado, mantendo constante a altura  $H$ ; o análogo para duas resistências em paralelo corresponde a dois planos inclinados dispostos lado a lado e uma única mão elevando sequencialmente duas esferas, cada uma percorrendo um plano. Este último arranjo pode ensejar discussões em torno da quantização da carga, representada por uma esfera, e da conservação desta, verificada nas junções dos planos inclinados que representam resistências em paralelo.

Outro aspecto que revelamos em um estudo nosso [15] deste análogo mecânico e que o diferencia dos demais análogos, reside no fato de que, com o

auxílio de um software de análise de vídeo, é possível extrair dados numéricos que permitem verificar quantitativamente a lei de Ohm e o efeito da densidade de centros espalhadores sobre a resistividade e resistência.



**Figura 3:** Análogo mecânico representando um circuito elétrico a) com baterias em paralelo, b) com resistores em paralelo; c) com baterias em série e d) com resistores em série.

### Considerações finais

A revisão da literatura relativa a analogias para o ensino de conceitos de eletricidade associados aos circuitos elétricos revelou a existência de quatro modelos análogos mais citados, quais sejam: hidráulico, mecânico, do movimento de multidões e de crianças, sendo o hidráulico é o utilizado a mais tempo. Os relatos sugerem que estas analogias oferecem significado aos conceitos de corrente elétrica, resistência elétrica, gerador, diferença de potencial, intensidade de corrente, interruptores, fios de ligação e destes elementos ligados em série e paralelo, excetuando a analogia de multidões que não apresenta análogo para a função de gerador.

O análogo mecânico, o qual investigamos experimentalmente, oferece um diferencial sobre os demais por facultar a obtenção de dados numéricos que permitem verificar a lei de Ohm e o efeito da densidade de centros espalhadores sobre a resistividade e resistência. A estrutura construtiva do análogo mecânico evidencia o caráter não localizado da resistência e da resistividade elétrica nos condutores, diferente das demais analogias, que sugerem localização da resistência elétrica em uma parte do condutor, imagem que acaba por ser reforçada pela utilização da representação esquemática dos circuitos elétricos.

## Referências

- [1] - GENTNER, D.; GENTNER, D.R., **Flowing Waters or Teeming Crowds: Mental Models of Electricit.** In: GENTNER, D.; STEVENS, A.L. (Ed.) **Mental Models.** New York: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1983. p.99 – 130.
- [2] - GLYNN, S., The Teaching With Analogies Model: Build conceptual bridges with mental models. **Science and Children**, New York, v. 44, n.8, p.52-55, April/May 2007.
- [3] - HARRISON, A. G.; TREAGUST, D. F., **Teaching and Learning with Analogies: Friend or Foe?** In: AUBUSSON, P. J., HARRISON, A. G. AND RITCHIE, S. M. (Ed.) **Metaphor and Analogy in Science Education.** Netherlands: Springer, 2006, p. 11-24.
- [4] - HAGLUND, J., Collaborative and self-generated analogies in science education, **Studies in Science Education**, London, v.49, n.1, p.35–68, 2013.
- [5] - GREENSLADE JR., T.B.; The Hydraulic Analogy for Electric Current., **The Physics Teacher**, New York, v.41, n.8, p.464-466, November 2003.
- [6] - SYMON, K. R., **Mecânica.** Rio de Janeiro: Editora Campus, 1996, p.382.
- [7] - REIF, F., **Física Estadística: Berkeley Physics Course – volume 5.** Barcelona: Editorial Reverté S.A., 1969, p.354.
- [8] - NUSSENZVEIG, H.M., **Curso de Física Básica – 3 Eletromagnetismo.** São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1997, p.106.
- [9] - ALMEIDA, M.J.B.M.; SALVADOR, A.; COSTA, M.M.R.R. Analogy for Drude's free electron model to promote students' understanding of electric circuits in lower secondary school, **Physical Review Special Topics – Physics Education Research**, v. 10, n. 020118, p.12 (2014)
- [10] - BAGNATO, V. S. O análogo mecânico da lei de Ohm. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.16, n. (1-4), p.129-131, 1994.
- [11] - BAGNATO, V. S; RODRIGUES, V. Análogo mecânico para condutividade elétrica dos metais: Efeito da temperatura. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.28, n.1, p.35-39, 2006.
- [12] - TAVARES, M.C.; FONTE BOA, M.; OLIVEIRA, P.M. A mechanical analogy for Ohm's law. **Physics Education**, v.26; p.195-199, 1991.
- [13] - MIRANDA, R. F.; ELLWANGER, A. L.; ORENGO, G. A. teoria microscópica da condução elétrica nos sólidos estudada por meio do análogo mecânico. **VIDYA**, Santa Maria, RS. v. 35, n. 1, p. 121-132, jan./jun., 2015
- [14] - WILLIAN, D.; BRUGNAGO, E.; CARMINATTI, N. L.; BAUMER, A. L.; BELLUCCO, A.; FLORES, T. C. Uma proposta experimental demonstrativa para explicar o modelo de Drude em sala de aula do ensino médio. In: XXI Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2015, Uberlândia. **Atas do XXI Simpósio Nacional de Ensino de Física**, 2015.
- [15] - SILVA, L.V.F. **Uso e avaliação de um análogo mecânico para o ensino do conceito de resistividade.** 2017. 61f. Monografia de final de curso – Departamento de Física, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2017.